DICIEMBRE 2008

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



NEUROCIENCIA
¿Existen genes de la inteligencia?

BIOLOGIA
Etiquetas de ADN para la taxonomía

GEOLOGIA
Nacimiento en directo de un océano

INTERNET
Nueva ciencia de la Red

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

EL REBOTE DEL UNIVERSO

La teoría de la gravedad cuántica predice que el universo no morirá nunca

00387
9 770210 136004

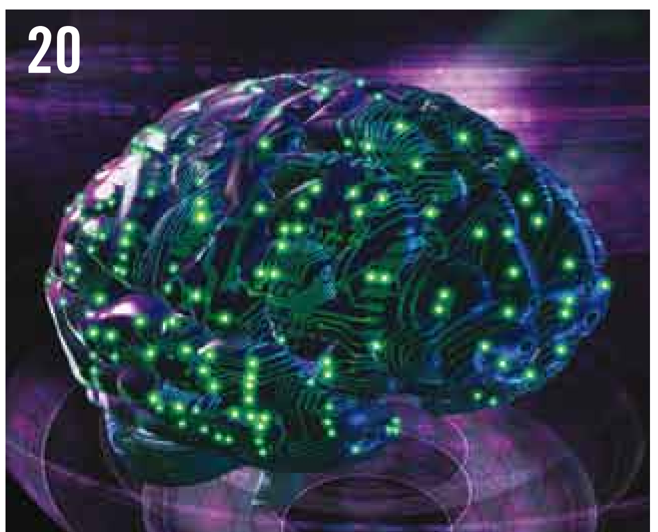
SUMARIO

Diciembre de 2008/ Número 387



42

Basta un fragmento corto de ADN mitocondrial para identificar una especie.



20

Interruptores fotosensibles de codificación genética arrojan luz sobre el entramado neuronal.



30

El cociente intelectual ofrece un retrato parcial de la inteligencia de una persona.

ARTICULOS

SECCIONES



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Steven Ashley, Peter Brown, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, George Musser, Christine Soares y Kate Wong
CONTRIBUTING EDITORS W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Michelle Press, Michael Shermer, Sarah Simpson
MANAGING EDITOR, ONLINE Ivan Oransky
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

CHAIRMAN Brian Napack
PRESIDENT Steven Yee
VICE PRESIDENT Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE, AND GENERAL MANAGER Michael Florek
MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Kevin House

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos
Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:
MMCATALAN PUBLICIDAD
M. Mercedes Catalán Rojas
Valle del silencio, 28 4.º J
28039 Madrid
Tel. 915 759 278 – Fax 918 276 474
Móvil 649 933 834

Cataluña:
Teresa Martí Marco
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. 934 143 344
Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero Osorio: *Rebote del universo*; Luis Bou: *Genética de la inteligencia, La ciencia de la Red* y *Puesta al día*; Pilar García-Villalba: *El código de barras de la vida*; Sònia Ambròs: *El nacimiento de un océano*; J. Vilardell: *Nuevas prótesis sin patente* y *Hace...*; Bruno Moreno: *Apuntes* y *Ciencia y sociedad*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Kenn Brown *Mondolithic Studios*

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo S.L. (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

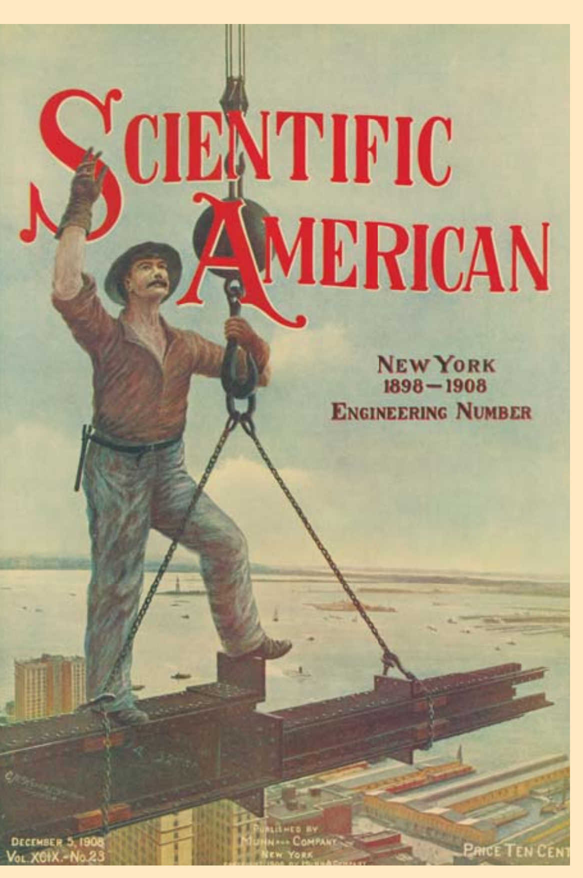
Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Evolución de la conducta. «Pero, ¿no es posible que bajo todas las variantes de la conducta humana subyazca una estructura interna de conducta heredada que caracterice a todos los miembros de una especie o género, o de un grupo taxonómico más extenso, al igual que el esqueleto de un ancestro primigenio caracteriza hoy la forma y la estructura de todos los mamíferos? Sí, es posible. Les pondré un ejemplo, en apariencia trivial, pero muy relevante a este respecto. A cualquiera que haya observado a un perro rascarse el morro o a un pájaro acicalarse las plumas de la cabeza le llamará la atención el hecho de que ambos actúan del mismo modo. Las aves se rascan también con un cuarto trasero (o sea, con una garra), para lo cual agachan el ala y elevan la garra hacia delante hasta pasada la espalda. Podría pensarse que sería más fácil para el ave mover la garra directamente hasta la cabeza sin mover el ala, que permanece plegada y pegada al costado. No veo manera de explicar tan torpe movimiento salvo que admitamos que es innato.
—Konrad Z. Lorenz»

[NOTA: Lorenz compartió el premio Nobel de Fisiología o Medicina de 1973 con Nikolaas Tinbergen y Karl von Frisch.]

Profesores robot. «¿Puede mecanizarse la enseñanza? B. F. Skinner, profesor Edgar Pierce de psicología de la Universidad de Harvard, cree que así debe ser, si queremos satisfacer la creciente demanda de educación que hay en todo el mundo. Ha diseñado y construido varias ‘máquinas de enseñar’ que no sólo presentan los temas al estudiante (como los materiales didácticos audiovisuales al uso), sino que también evalúan continuamente al alumno sobre la información que éste va adquiriendo. Skinner y sus colaboradores han empleado máquinas de ese tipo para impartir parte de un curso sobre conducta humana a casi 200 estudiantes de Harvard y del Colegio Radcliffe.»



A LA INGENIERIA CIVIL debemos los puentes que conectan una isla con sus pobladores, 1908.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XCIX, N.º 23; 5 DE DICIEMBRE DE 1908

...cien años

Demoiselle. «El renombrado experimentador brasileño Santos Dumont ha vuelto a echar mano una vez más del diminuto aeroplano con el que realizó algunos experimentos la primavera pasada. Para mejorar la estabilidad transversal del monoplano, ha situado las alas formando un leve ángulo diedro y ha bajado su asiento y el motor un metro aproximadamente. Esa opción desplaza el centro de gravedad hasta muy por debajo de la línea de sostén. La envergadura de las alas es de apenas cinco metros. Gracias al reducido tamaño del aparato (al que ha bautizado ‘Demoiselle’), Santos Dumont pudo transportarlo desde París a Saint Cyr en la parte trasera de un automóvil.»

Ingeniería civil. «El problema del transporte en Nueva York lo dificulta y encarece sobremanera el hecho de que en ella viven dos millones de personas, y otras tantas más salen y entran a diario de esta isla larga y estrecha, que está separada del continente por unos ríos anchos y profundos. Para vencer ese aislamiento, la iniciativa pública y la privada han construido, durante el último decenio, no menos de catorce túneles y tres de los puentes de mayor luz del mundo.»

...ciento cincuenta años

Luz para el mundo. «Las velas se cuentan entre las primeras invenciones de los padres de nuestra estirpe; pese al fluido lampante, el gas y el aceite de petróleo, conservan todavía su puesto entre los iluminantes: un lujo para los ricos, una bendición para los pobres. Sin embargo, hemos de decir que la vela es un artículo grasoso, que forma chorreras y cuyo pábilo hay que cortar a menudo; o más bien eso era antes, pues deseamos dar noticia de una invención que salva tales inconvenientes. Se ha patentado un procedimiento para reforzar o endurecer las velas comunes hasta igualarlas al esperma de ballena o sus variedades más preciadas. El revestimiento reforzado, al fundirse a una temperatura mucho más alta que el sebo, hace que la vela se consuma adquiriendo una bella forma de copa, que evita el chorreo.»

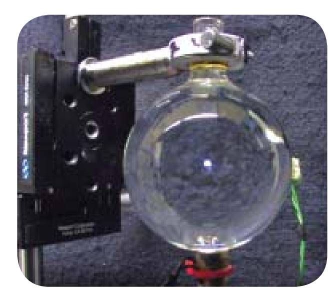
Elefantes. «El *Observer* de Ceilán informa de la visita reciente de sir Henry Ward a varios ladrillares. Las fábricas, que producen unos 20.000 ladrillos al día, están a sólo unos diez kilómetros de Colombo. Se emplean elefantes para preparar la arcilla que se usa en la fabricación de los ladrillos. Trabajan juntos animales salvajes y domados; ambos intentan eludir el esfuerzo tratando siempre de posar los pies en las huellas ya impresas, y no en el blando y tenaz barro virgen.»

¿Qué ha sido de ...?

Recopilación de Philip Yam

Burbujas disipadas

Las burbujas creadas en agua por ondas ultrasónicas pueden aplastarse con tal velocidad, que producen destellos luminosos [*véase* "Sonoluminiscencia: el sonido en la luz"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 1995]. En 2002, Rusi Taleyarkhan, entonces en el Laboratorio Nacional de Oak Ridge, aseguró haber logrado una fusión nuclear mediante esas burbujas. En 2006 publicó un segundo informe, donde daba cuenta de una nueva fusión nuclear. En ninguno de ambos casos les resultó posible a otros investigadores reproducir los resultados de Taleyarkhan. Ello suscitó escepticismo y sospechas, pues Taleyarkhan tampoco había dado a conocer sus datos. Por otra parte, sus resultados de 2006 se explicarían por una contaminación con un radioisótopo.



1. El colapso de las burbujas creadas por ondas ultrasónicas en el líquido de un matraz produce destellos de luz.

Es posible que la efervescencia provocada por la fusión en burbujas se haya disipado. Tras la segunda investigación, expertos de la Universidad Purdue (institución a la que Taleyarkhan pertenece en la actualidad) formularon en julio de 2007 dos cargos de investigación falaz, tras concluir que Taleyarkhan había hecho creer que otros miembros de su laboratorio habían verificado de forma independiente el efecto de sonofusión. (Taleyarkhan había sido exonerado en un expediente anterior, pero los legisladores exigieron una indagación más completa de sus investigaciones, que recibieron una subvención pública de 318.000 dólares.) Taleyarkhan, desposeído de su cátedra a finales de agosto, ha apelado.

En 2007, Kenneth Suslick, de la Universidad de Illinois, y Seth Putterman, de la Universidad de California en Los Angeles, reconstruyeron el experimento original de Taleyarkhan, pero no observaron fusión. Los científicos han abandonado la empresa. Según Suslick, esos experimentos estaban, en el mejor de los casos, mal concebidos y llevaban años sin merecer credibilidad.

—J. R. Finkel

Padre de familia... o no

Se reduce la probabilidad de que Jorge el Solitario sea padre. Este solterón es famoso por ser el único superviviente de una población de tortugas de Pinta, una isla septentrional del archipiélago de Galápagos. Piratas y marinos habían devorado a todos los demás individuos de su especie. En la actualidad, Jorge reside en la estación de investigación Charles Darwin, en Santa Cruz. Dos hembras traídas de la isla Isabela le hacen compañía desde 1990. Aunque Jorge ha mostrado escaso interés u osadía sexual, una de las hembras produjo en julio nueve huevos, tres de los cuales no habían sufrido daños y fueron recogidos para incubación. Dado que las tortugas pueden poner huevos no fecundados, no se sabrá si Jorge ha engendrado descendencia hasta que éstos, de ser fértiles, hagan eclosión. Sin embargo, hasta la fecha de redacción de esta nota, los huevos han experimentado una pérdida excesiva de peso y algunos de ellos muestran hongos en la cáscara. Unos resultados poco alentadores.



¿Está vivo?

La inclusión, o no, de los virus entre los seres vivos lleva decenios siendo objeto de debate [*véase* "¿Tienen vida los virus?" en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2005]. Se ha descubierto, en la Universidad del Mediterráneo en Marsella, que los virus pueden sufrir enfermedades por infección de otros virus. Este hallazgo, publicado el 4 de septiembre en *Nature* (6 de agosto en la Red), aporta datos que respaldan la hipótesis de que los virus corresponden a seres vivos.

Los investigadores examinaron un mamavirus (denominado así por ser mayor todavía que el mimivirus, virus gigante descubierto en 1992), que mide unos 750 nanómetros, casi tanto como una bacteria pequeña. Un estudio apoyado en la observación con microscopio electrónico ha revelado la presencia de un pequeño virus, de unos 50 nanómetros de diámetro, íntimamente ligado al mamavirus. El virus satélite, al que han llamado Sputnik, es incapaz de infectar células; deja al mamavirus que haga el trabajo. Después, Sputnik secuestra la fábrica de replicación que el mamavirus ha plantado en la célula.

2. El virus "Sputnik" (*verde*) y el mamavirus (*rojo*) proliferan en las inmediaciones de núcleos de ameba (*azul*).

El resultado es la producción de más sputniks y menos mamavirus, que a menudo resultan deformes. Los estudios genómicos llevan a pensar que los virus gigantes y sus "virófagos" pueden ser corrientes en los mares.

—Charles Q. Choi

Trabajo luminoso

Los diodos fotoemisores, o leds, se están abriendo paso en la vida diaria [*véase* "Diodos emisores de luz," en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril de 2001]. Aun así, una lámpara de leds que equivalga a una bombilla de incandescencia de 60 watt cuesta alrededor de 70 euros. En la Universidad de Purdue han hallado un procedimiento para fabricar a menor precio los leds azules, necesarios para generar luz blanca. Con la técnica actual, tales leds exigen la deposición de nitruro de galio sobre un sustrato de zafiro, más un reflector aparte para orientar la luz. En *Physics Applied Letters* del 14 de julio, los investigadores de Purdue exponen la construcción de leds sobre silicio provisto de una capa incrustada de material reflectante, lo que reduce costes. Y pronostican que, de ser producidos en masa, en el plazo de dos años podrían llegar al mercado lámparas de leds a precios aceptables.

MATERIALES

Armaduras escamosas

Un fósil viviente podría inspirar las corazas del futuro. Un grupo de ingenieros del Instituto de Tecnología de Massachusetts, con financiación del ejército norteamericano, estudiaron *Polypterus senegalus*, especie de pez, primitiva y apodada la "anguila dinosaurio" debido a la coraza que la recubre. En experimentos que imitaban los mordiscos de un depredador, los investigadores encontraron que cada escama está formada por tres capas sobre soporte de hueso que se complementan mutuamente para impedir la penetración. La capa exterior es la más dura y la más resistente a los dientes afilados. La capa intermedia es más blanda y disipa energía al deformarse. La última capa tiene una estructura similar al contrachapado, lo cual evita que las grietas se extiendan. La secuencia exacta de estas capas mantiene de forma excepcional la fuerza de la armadura. Se encontró que, al sustituir la capa exterior y la intermedia en simulaciones, aumentaba el riesgo de que la escama se rompiese. Estos resultados podrían aclarar el curso evolutivo de los peces y descubrir nuevos modos más eficaces de diseñar blindajes. —*Charles Q. Choi*



CORAZA ESCAMOSA: La "anguila dinosaurio" podría guardar el secreto de los blindajes del futuro.



CAMBIO CLIMATICO

Problemas a la vista para los arrecifes

Un nuevo estudio confirma que los arrecifes de coral se enfrentarán a graves dificultades con el aumento progresivo de la concentración de gases con efecto invernadero. La razón estriba en las sustancias de cementación que mantienen unidos los arrecifes y los anclan; tales sustancias no pueden formarse en un agua llena de dióxido de carbono (CO_2) en disolución. El agua naturalmente ácida del océano Pacífico, junto a las costas de Centroamérica, hace que los arrecifes locales sean más blandos. Se trata de un aviso de lo que podría ser el futuro de los arrecifes de todo el mundo, conforme vayan aumentando los niveles de CO_2 atmosférico. —*David Biello*

OPTICA

Un microscopio en un céntimo

Un microscopio sin lentes del tamaño de una moneda de diez céntimos podría examinar la sangre de forma rápida y barata, para descubrir la presencia de células cancerosas y parásitos. En el dispositivo, creado por Changhuei Yang y su equipo del Instituto de Tecnología de California, la luz brilla sobre una muestra líquida que fluye a través de un estrecho conducto, bajo el cual se encuentran aberturas de una micra de ancho separadas 10 micras. La luz brilla a través de los agujeros sobre un chip semiconductor, equipado con píxeles sensores similares a los de las cámaras digitales. Los objetos que floten sobre las aperturas bloquearán parte de la luz recibida por los píxeles, los cuales formarán una imagen del objeto gracias a las variaciones en la intensidad lumínica. Se pueden distinguir estructuras de 0,8 o 0,9 micras de tamaño (las células cancerosas suelen tener un tamaño de 15 a 30 micras). En un microscopio basado en un chip, "no hay lentes que puedan romperse", afirma Yang, que se inspiró en los grupos de células muertas y otros residuos flotantes que se encuentran en los ojos. Lo que es aún mejor, estos microscopios no cuestan ni 10 euros. —*J. R. Minkel*



ESTE MICROSCOPIO del tamaño de una moneda funciona sin lentes; utiliza sensores similares a los de una cámara digital.

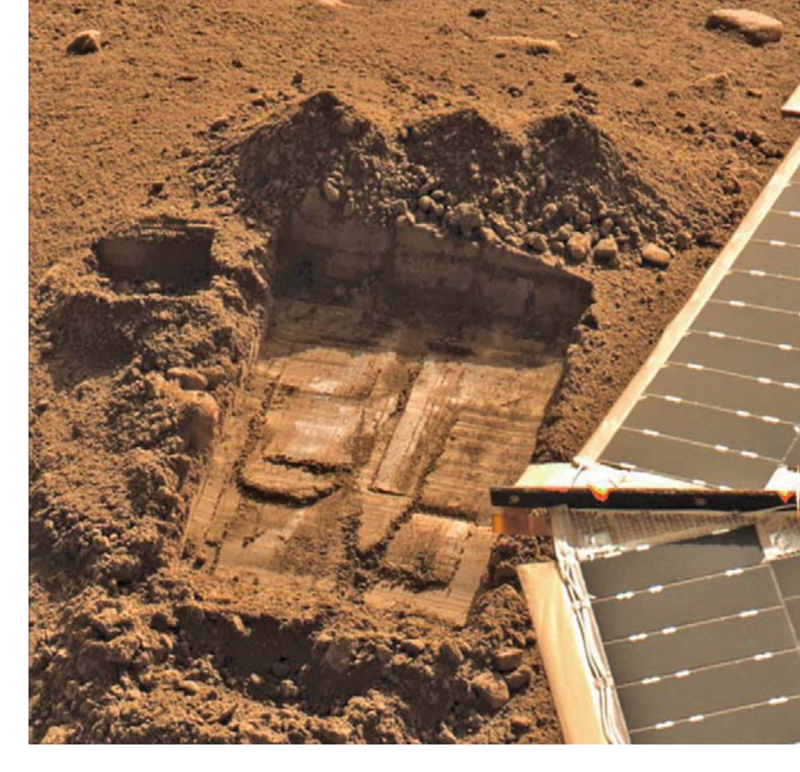
CORTESIA DE DONNA COVENEY *Instituto de Tecnología de Massachusetts* (*pez*); JEFF FOOTT *Getty Images* (*arrecife de coral*); CORTESIA DE CHANGHUEI YANG *Instituto de Tecnología de California* (*céntimo y microscopio*)

MARTE

Agua y perclorato

La sonda *Phoenix* descubrió pruebas de la presencia de agua helada y de perclorato (ClO_4) en el suelo de Marte. El perclorato, un producto químico muy reactivo que puede producirse de forma natural en zonas áridas, como el desierto chileno de Atacama, se detectó en dos muestras de tierra analizadas por el laboratorio de química del estado líquido de la sonda *Phoenix*. El perclorato, al que se considera perjudicial para los fetos, proporciona un combustible útil para algunos microorganismos. Por esa razón, el descubrimiento apenas proporciona información por sí mismo sobre la posibilidad de que exista vida en Marte, afirman los científicos de la NASA. También se encontró agua congelada en muestras de terreno vaporizadas por el instrumento de análisis de gases de la sonda. Los resultados confirman las observaciones del año 2002 realizadas por la sonda orbital *Odissey*, que detectó hielo en forma de átomos de hidrógeno subterráneos en los polos del planeta. A la vista de estos éxitos, la agencia espacial amplió la misión de la *Phoenix* unas semanas más. En noviembre, se la ha dado por perdida definitivamente.

—J. R. Minkel



EL PERCLORATO, un alimento para los microorganismos, se detectó en esta zanja.

NANOTECNIA

El material más negro

Un grupo del Instituto Politécnico Rensselaer y de la Universidad Rice ha creado el material más oscuro conocido: una alfombra compuesta de nanotubos dispuestos verticalmente. Este nanobosque devuelve menos de un 0,1 por ciento de la luz que recibe. Semejante reflectividad no es ni un tercio de la que tenía el material al que antes se tenía por el más negro conocido, una película de aleación de níquel-fósforo (la pintura negra normal refleja entre un 5 y un 10 por ciento).

Los huecos entre los nanotubos atrapan la luz y los nanotubos, fabricados a partir de nanopuntos de hierro sobre una oblea de silicio, se disponen con un espaciado oportuno, de modo que se cree una superficie irregular que disperse la luz y minimice la reflexión a la vez que maximiza la absorción. Este nuevo material podría aumentar la eficacia de las células solares, los sensores infrarrojos y los detectores astronómicos que absorben la radiación del espacio.

—Charles Q. Choi

MEDIOAMBIENTE

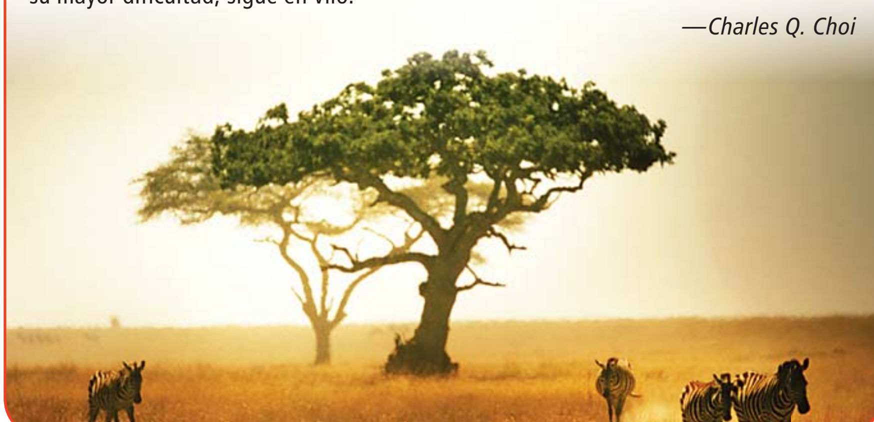
Una línea de defensa

Hace tres años, las naciones del norte y el centro de Africa que forman la Comunidad de Estados del Sahel y del Sáhara acordaron plantar un cinturón de árboles a lo ancho del continente para frenar el avance implacable del desierto del Sáhara. El pasado mes de junio pusieron los cimientos de la Gran Muralla Verde de Africa con la aprobación formal de una fase inicial, de dos años de duración.

Se han creado varias barreras verdes contra el Sáhara desde los años sesenta, pero la mayoría tuvieron una extensión restringida. La Gran Muralla Verde alcanzará, en cambio, 15 kilómetros de anchura y abarcará desde Mauritania al oeste hasta Yibuti al este, una distancia de unos 7000 kilómetros. El objetivo es proteger el Cinturón del Sahel, la árida sabana al sur del Sáhara, y evitar que su valiosa tierra arable se torne desértica. Los árboles proporcionarán una fuente de leña y fruta, y también puestos de trabajo. Los proyectos para regar estos árboles, por ejemplo mediante la recogida de agua de lluvia, podrían ayudar a la población a regar sus campos durante todo el año o incluso permitirles practicar la piscicultura.

Las primeras plantaciones piloto de árboles locales como la acacia (*véase la figura*) deberían haber comenzado en septiembre. Sin embargo, la financiación del proyecto, su mayor dificultad, sigue en vilo.

—Charles Q. Choi



CORTESIA DE NASA/JPL-CALTECH/UNIVERSIDAD DE ARIZONA/UNIVERSIDAD A&M DE TEXAS (*marte*); TOMEK SIKORA *Getty Images* (*acacia*)

Sismología del hielo

Se están perfeccionando técnicas de análisis sismológico para investigar el interior de los glaciares

En ambos polos los glaciares se derriten, se fragmentan y avanzan hacia el mar a velocidades alarmantes. Con muy pocas excepciones, los glaciares del mundo han ido disminuyendo en tamaño desde los inicios del siglo XX, según el Centro Nacional de Datos sobre la Nieve y el Hielo de Boulder, Colorado. Esa retirada de los glaciares se atribuye al calentamiento global. Las consecuencias no son difíciles de imaginar: un mundo más caliente podría implicar un mayor derretimiento de los hielos, un aumento del nivel de los mares y la inundación de las zonas costeras.

Para saber más sobre lo que está sucediendo, los investigadores de una nueva especialidad, la sismología de glaciares, vienen refinando las técnicas para rastrear los cambios del hielo en tiempo real. En particular, se valen de instrumentos sismológicos para registrar los movimientos del hielo, del mismo modo que un médico utiliza monitores cardiológicos para evaluar la salud de un paciente. Gracias a esta auscultación del hielo se sabrá mejor la transformación de los glaciares en el curso de cortos períodos de tiempo. Contrasta mucho con métodos más tradicionales que, para documentar los movimientos del hielo a gran escala y a largo plazo, recurrían a fotografías, imágenes de satélites y mediciones directas por parte de los glaciólogos.

La sismología de glaciares nació a raíz del sorprendente descubrimiento en 2003 de una nueva clase de movimientos del hielo en Groenlandia por parte de Göran Ekström y Meredith Nettles, de la Universidad de Columbia. Se registraron unas fuertes señales en todo el mundo atribuidas al avance brusco del hielo de los glaciares de Groenlandia: diez metros en menos de 60 segundos. Este tipo de suceso, propio del final del verano, había venido siendo más frecuente al menos desde el año 2000, lo que indicaba una clara relación con el cambio climático a gran escala. Desde entonces se han observado otros movimientos a corto plazo y características a pequeña escala dentro del hielo: aparición de grietas, fragmentación en el extremo del glaciar, agua que surge debajo del hielo y se introduce en las grietas del fondo y puntos de fricción bajo el glaciar.

Antes de que se puedan utilizar los datos para predecir el comportamiento del hielo y las consecuencias del cambio climático, hay que saber interpretar los registros sísmicos. Así, lo que en un principio se identificó en algunas publicaciones como un "terremoto en el hielo" de Groenlandia parece, sin embargo, constituir un tipo distinto de movimiento del hielo. En el seminario de junio del consorcio de entidades sismológicas IRIS en Stevenson (estado de Washington), Meredith Nettles abogó por la posibilidad de que los aparentes terremotos en el hielo no correspondieran a avances bruscos, sino a grandes fragmentaciones del hielo.

Cuando un glaciar se fragmenta, se separan masas enormes de hielo, algunas de medio kilómetro cúbico de tamaño; se disgregan de repente y transfieren grandes masas de agua dulce de la tierra al mar, con lo que el nivel de éste aumenta instantáneamente. Según un estudio publicado en el número de *Science* del 24 de agosto de 2007, el derretimiento y la fragmentación de los glaciares (no de los icebergs o de las placas de hielo) es responsable de más de la mitad del hielo incorporado al mar desde 1996. Shad O'Neel, coautor del estudio y glaciólogo del Servicio de Inspección Geológica de Anchorage, estudia las tendencias a la fragmentación de glaciares de Alaska con instrumentos sismológicos locales. En esa zona, el borde frontal del glaciar Columbia ha retrocedido, a causa de la fragmentación, entre 16 y 18 kilómetros en los últimos 25 años. Pero el glaciar entero avanza. La explicación: el hielo progresa a mayor velocidad, pero se fragmenta aún más rápidamente. El aumento del nivel del mar constituye una poderosa razón para entender los movimientos del glaciar.

En la parte meridional del mundo se están estudiando también los avances bruscos de los glaciares. Mediante el análisis de los registros sísmicos, Douglas Wiens, sismólogo de la Universidad de Washington, y Sridhar Anandakrishnan,



MARKUS RENNER *Getty Images*

Rotura de hielo: los datos sísmicos permiten escrutar el interior de los glaciares antes de que se fraccionen.

glaciólogo de la Universidad estatal de Pennsylvania, descubrieron que el glaciar Whillans, de la Antártida, progresa de forma espasmódica dos veces al día, con las mareas, y que esos avances se van enlenteciendo, al menos desde 1994. Una explicación, indica Anandakrishnan, podría ser que el aumento del nivel del mar inducido por el clima repercuta en los movimientos del hielo. Con el conocimiento de las causas profundas de la fragmentación y de los avances bruscos del hielo se sabrá mejor cómo responderá el hielo a un mundo que se va calentando. Estos temas se pusieron de manifiesto en el seminario de junio de IRIS, que celebró su primera sesión sobre sismología de los glaciares, coorganizada por Wiens. En dicha sesión, tanto Nettles como Anandakrishnan y muchos otros presentaron sus resultados. Nos hallamos ante un campo de investigación en progreso rápido. Los sismólogos consiguen un nuevo ámbito de aplicación de sus conocimientos, los glaciólogos obtienen una nueva herramienta que aplicar al hielo y todo el mundo sabe más de los cambios del hielo.

Krista West
Fairbanks, Alaska

Voces de la naturaleza

La actividad humana perturba las sinfonías naturales

Bernie Krause, bioacústico, comprendió en la Reserva Nacional Masai Mara de Kenia cuánto puede enseñarnos el paisaje sonoro. Grababa allí para la Academia Californiana de las Ciencias el sonido de aves, mamíferos, insectos, reptiles y anfibios en su medio natural. Krause fue uno de los primeros en usar el sintetizador Moog: lo tocó a finales de los años sesenta para George Harrison, *The Doors* y otros músicos de rock de finales de los sesenta. El espectrograma de un paisaje sonoro natural le pareció una partitura: "Cada animal tenía su propio nicho, su propio territorio acústico, como los instrumentos de una orquesta".

Lo bien que se armonicen estos músicos naturales, concluye Krause, dice mucho sobre la salud del medio. Muchos animales evolucionaron para emitir sonidos en los nichos disponibles, de manera que pudieran hacerse oír por sus parejas y por otros animales de la misma especie, pero el ruido de las actividades humanas, desde los aviones que sobrevuelan una zona hasta el paso de los vehículos por una carretera cercana, supone una amenaza para el éxito de los procesos reproductivos de los animales.

Desde finales de los sesenta, Krause ha recolectado más de 3500 horas de paisajes sonoros de Africa, Centroamérica, el Amazonas y los Estados Unidos. Ha encontrado que al menos el 40 por ciento de esas sinfonías naturales se ha alterado tan radicalmente, que muchos miembros de las correspondientes orquestas tienen que haber desparecido. "Se han talado bosques y desecado humedales, se ha asfaltado el terreno y el ruido humano se ha extendido, transformando totalmente el paisaje sonoro", afirma Krause, que dirige Wild Sanctuary en Glen Ellen, California, un archivo de sonidos naturales. No hace mucho, viajó al Parque Nacional de Katmai y al Refugio Nacional de Vida Salvaje del Artico en busca de sonidos sin contaminar y, aun en parajes así, tenía que alejarse de las carreteras para conseguirlo.

Thomas S. Schulenberg, especialista en aves neotropicales de la Universidad de Cornell y coautor del libro *The Birds of Perú,* coincide en que los sonidos constituyen una herramienta muy útil para evaluar los entornos naturales. Schulenberg viajó a Vilcabamba, una gran extensión de selva tropical montañosa en la zona oriental de Perú, a la cual quería acceder la organización Conservation International para evaluar la posibilidad de protegerla. Aunque el ornitólogo llevaba unos prismáticos, se acercó a su coro matutino con un micrófono direccional y una grabadora. Como dice el propio Schulenberg, "se oye a más pájaros de los que se ven".

Schulenberg opina que los animales se adaptan a un cierto grado de contaminación acústica, pero existen límites, en particular si el ruido se convierte en una característica permanente del entorno. El biólogo Henrik Brumm, de la Universidad Libre de Berlín, descubrió, mientras escribía para el *Journal of Animal Ecology*, que los ruiseñores territoriales macho de Berlín tenían que cantar cinco veces más alto en una zona de mucho tráfico. "¿Afecta eso a la musculatura que necesitan para cantar?", se pregunta. "¿Podrían cantar aún más alto o terminarán por alcanzar una barrera infranqueable y sus trinos serán absorbidos por el ruido del hombre?"

El Servicio de Parques Nacionales de los Estados Unidos de América, por medio de su Programa de Sonidos Naturales, se enfrenta a preguntas similares. Karen K. Trevino, la directora del programa, cita estudios que muestran que, al verse expuestos a sonidos de aviones y helicópteros, los carneros de las Rocosas se desorientan en la búsqueda de comida, las cabras monteses huyen y cae la tasa de reproducción de los caribúes. Kurt Fristrup, especialista en acústica del Servicio, señala que los sonidos humanos causan problemas que van más allá del fastidio que producen. En particular, pueden "ocultar algunos sonidos naturales importantes, aunque menos intensos, como el ruido de pisadas o de la respiración, que sirven a los depredadores de indicio al perseguir a sus presas y a esas mismas presas para escapar de los depredadores".

Según Krause, el sonido puede ayudar a determinar cómo afecta la destrucción de un hábitat a sus especies. A este respecto, estudió durante 15 años en Lincoln Meadow, en la Sierra Nevada de California, una región donde los árboles se talaban de forma selectiva. Los madereros decían que apenas se producirían cambios y, en efecto, las fotografías mostraban muy pocas alteraciones. Sin embargo, las grabaciones de Krause revelaron una reducción drástica de la diversidad y la densidad de especies. "La transformación de una potente sinfonía natural en un silencio casi absoluto resultaba muy alarmante", afirma.

Michael Tennesen

El límite superior del bosque

Interacciones en la frontera del bosque subalpino y los pastos alpinos

Las montañas son una reserva única de biodiversidad de plantas y endemismos, sometidas a gradientes climáticos y topográficos intensos, marcados por la altitud, el relieve y la dinámica atmosférica. Tal diversidad de plantas y ambientes está ligada a la aparición y sustitución de comunidades que intercambian especies a través de las fronteras que los separan: los ecotonos.

Uno de los ecotonos más visibles e importantes en las montañas es el límite superior de los bosques. Este ecotono se forma entre los bosques subalpinos de coníferas (pinos, abeto) o frondosas (abedul, haya) y los pastos alpinos. El límite del bosque ha sido estudiado por geógrafos, botánicos y ecólogos; por considerarse su posición en altura un "termómetro" ambiental de las fluctuaciones de la temperatura a escalas milenarias. Se han asociado períodos cálidos a ascensos de este ecotono y períodos fríos a su descenso. Esta visión paleoecológica, ligada a las limitaciones de temperatura que impone la altitud, no se puede transferir directamente en todos los casos a escalas ecológicas temporales menores (décadas, siglos). En muchas montañas de zonas frías o templadas, el límite del bosque no siempre ha ascendido por el aumento reciente de las temperaturas. En ocasiones ha reaccionado de forma compleja, con gran variabilidad, inercia o incluso mostrando respuestas nulas.

El cambio climático ha fomentado muchas veces el crecimiento de las especies arbóreas que forman el límite del bosque, pero esta estimulación no ha venido siempre acompañada de una mayor regeneración. Además de la disponi-

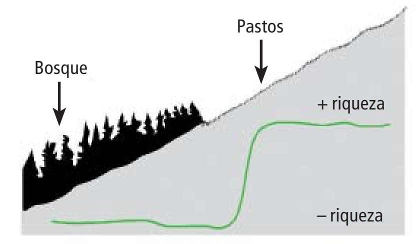
ECOTONOS

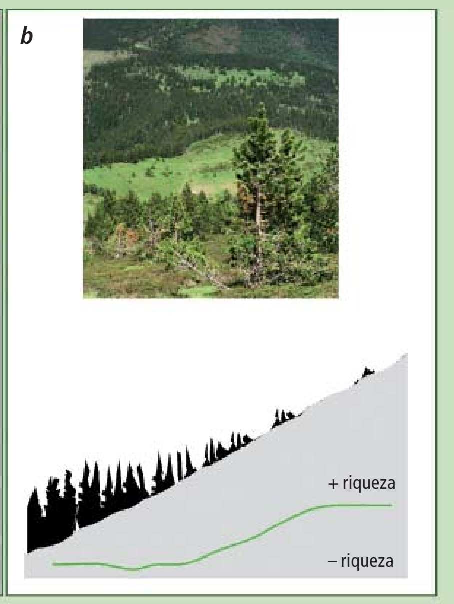
Los cambios de estructura del bosque y de los patrones de la riqueza de plantas del sotobosque indican la dinámica reciente del ecotono del límite superior del bosque. En los Pirineos existen límites del bosque que forman fronteras bruscas en lo concerniente a la densidad y altura de los árboles, a la riqueza de arbustos y herbáceas (*línea verde*); dicha riqueza vegetal aumenta mucho por encima del bosque (*a*, límite del bosque de pino negro en la sierra de las Cutas, 2150 m, Ordesa, Huesca).

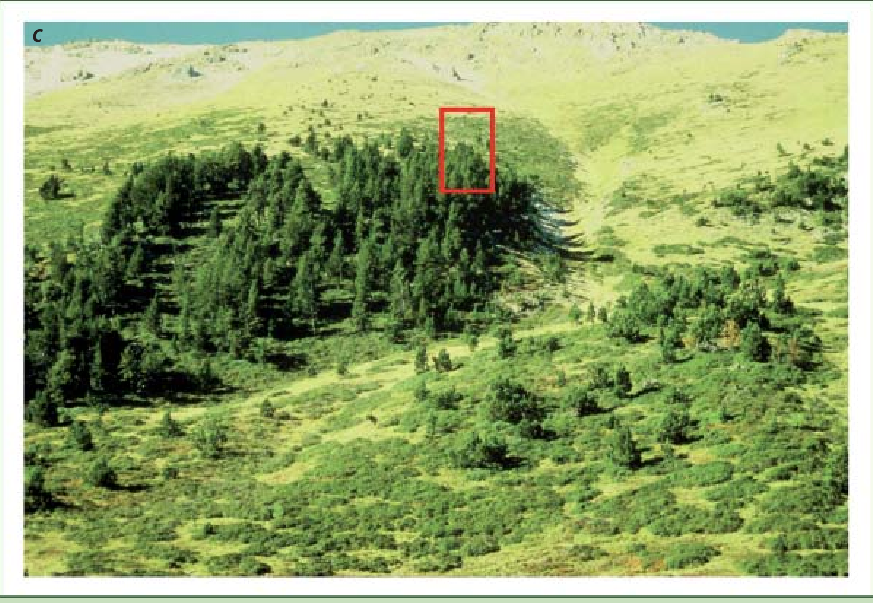
Sin embargo, existen muchos otros ecotonos en los que la densidad y altura de los árboles disminuye gradualmente al ascender, mientras que la riqueza de plantas alpinas aumenta, también de forma gradual (*b* y *c*, límite del bosque de pino negro en el Tessó del Son, 2350 m, próximo al lago de San Mauricio, Lérida). Los cambios bruscos del primer ecotono (*a*) están determinados por los intensos vientos que erosionan las yemas y acículas de los árboles; así se crean pinos con formas arbustivas (*krummholz*), mientras que los cambios graduales del segundo ecotono (*b*) están más asociados a los patrones del espesor de la nieve. En este segundo caso, los aludes determinan la formación de bandas de bosque separadas por canales de aludes (*c*, el cuadrado rojo indica la localización de la parcela estudiada y mostrada en *b*).

La riqueza de plantas aumentó mucho al ascender en el primer ecotono, con cambios bruscos debido a la heterogeneidad del suelo (*a*), mientras que el aumento fue más gradual en el segundo ecotono (*b*), donde el sotobosque está dominado por matas densas de rododendro que condicionan la riqueza y abundancia de herbáceas y de plántulas de pino.









bilidad de suficientes semillas viables, las plántulas deben encontrar, para sobrevivir, lugares y sustratos adecuados que les permitan germinar y superar la competencia de las especies herbáceas y arbustivas. Una vez establecidas, las plántulas se verán sometidas a un severo estrés climático: elevada radiación, bajas temperaturas y vientos intensos. Debido a este estrés, algunos árboles, auténticos bonsáis de montaña, muchas veces muy longevos, adoptan una forma de crecimiento arbustivo, en *krummholz* (que en alemán significa "madera retorcida"). Por tanto, a escalas temporales de decenios y siglos, el aumento de temperatura no siempre conlleva un ascenso del límite del bosque. A menudo, la "invasión arbórea" de los pastos alpinos puede depender de factores locales (topografía, sustrato) o de la propia dinámica del bosque más que de factores regionales externos (el clima).

En muchas montañas europeas, en los Pirineos por ejemplo, el cambio reciente del clima ha coincidido con el despoblamiento de las zonas de alta montaña y el abandono de sus usos tradicionales. Muchos siglos atrás, se talaron o quemaron los bosques subalpinos para convertirlos en pastos, de elevada productividad y diversidad de especies. Actualmente, la drástica caída de la presión ganadera en los prados alpinos ha favorecido la expansión del bosque y la recolonización de terrenos antaño forestados. El aumento de la densidad de árboles dentro del ecotono bosque-pastos es generalizado en casi todas las montañas, pero no se sabe si esta recolonización se halla más condicionada por el descenso del pastoreo, por el cambio del clima o por ambos.

La altura, la edad y la disposición espacial de los árboles en el ecotono del límite superior del bosque forman patrones característicos, a partir de los cuales podemos inferir qué procesos han determinado la estructura reciente del ecotono. No sólo la estructura del límite del bosque, sino también sus patrones espaciales de riqueza vegetal descubren la historia reciente del ecotono. Los cambios en la diversidad de plantas a medida que ascendemos y pasamos del bosque a los pastos reflejan aspectos de la heterogeneidad del suelo y del sustrato, así como la influencia de los árboles sobre los patrones de diversidad vegetal. Al mismo tiempo, la disposición del sotobosque y su cobertura influyen en la capacidad del bosque de expandirse hacia arriba (*véase el recuadro*).

Apenas existen datos y modelos que evalúen si el ascenso pronosticado de los bosques afectará a la distribución y riqueza de las plantas alpinas, de modo que queden restringidas a hábitats sin bosque (roquedos, neveros, turberas). Las pocas descripciones a pequeña escala de los patrones espaciales de la riqueza vegetal a lo largo del ecotono deberían extrapolarse a escalas regionales para poder predecir si el bosque y las especies subalpinas más competidoras amenazan a la flora alpina, compuesta mayoritariamente por especies perennes con baja capacidad colonizadora. Los gestores deberían además valorar dónde y cuándo se debe priorizar la recuperación del bosque y dónde y cuándo la conservación de pastos y la flora alpina rica en endemismos.

J. Julio Camarero
ARAID, Instituto Pirenaico de Ecología, CSIC, Zaragoza

Enric Batllori y Emilia Gutiérrez
Depto. de Ecología, Universidad de Barcelona

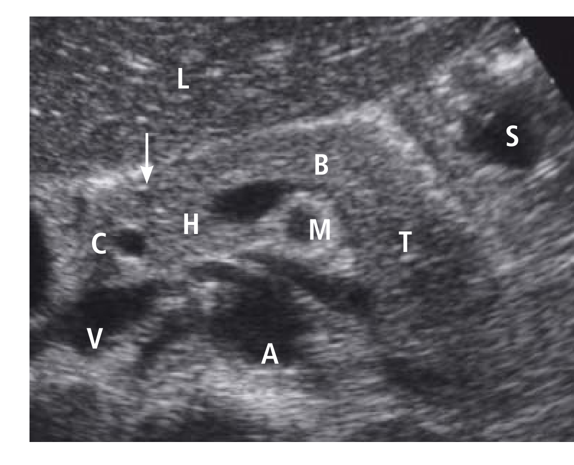
Ultrasonidos en la exploración del páncreas

Siguen siendo el medio más empleado, con versiones mejoradas

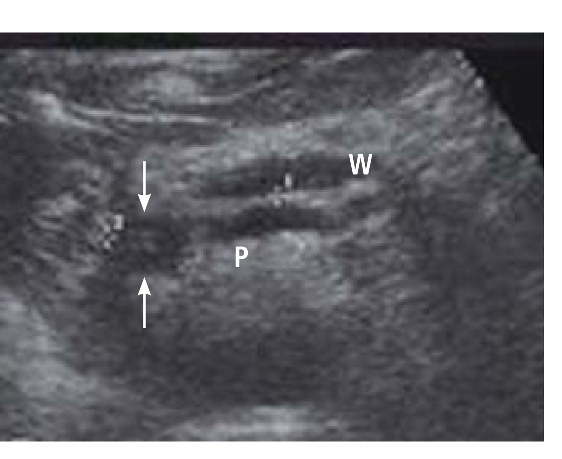
La imagen del páncreas obtenida mediante ultrasonidos (US), la ultrasonografía del páncreas, ha significado un gran avance y desempeña una importante función en la detección, caracterización y clasificación de la gravedad de las enfermedades pancreáticas. Esta técnica no invasiva sigue siendo el primer paso en la evaluación del páncreas. De acuerdo con la bibliografía, se puede visualizar el páncreas por US en el 93 % de los pacientes. No obstante, para obtener una visualización cabal de todas las porciones del páncreas es conveniente completarla con otras técnicas: llenar el estómago con agua, examinar al paciente en inspiración o espiración mantenida y cambiar de posición al enfermo.

El páncreas, que se encuentra a la altura de la primera o segunda vértebras lumbares, puede, dependiendo de la fase respiratoria, quedar a un nivel ligeramente craneal o caudal. El radiólogo debe evaluar la textura, tamaño y contorno del órgano y sus partes anatómicas. El páncreas normal es, por lo habitual, homogéneo y su capacidad de devolver un eco de la señal acústica, su "ecogenicidad", equivale o supera a la del hígado normal.

El páncreas es un órgano abdominal con una situación central, por detrás del estómago y por delante de los vasos que forman el eje esplenoportal y los grandes vasos, como la aorta y la vena cava (*véase la figura 1*). El páncreas se divide en cabeza, cuello, cuerpo y cola. Su tamaño depende de la constitución física del paciente y disminuye con la edad. Resulta por tanto difícil de establecer los límites de sus dimensiones. De una manera orientativa, la cabeza mide 2 cm; cuello, menos de 1 cm; cuerpo y cola, entre 1 y 2 cm.



1. Anatomía ultrasonográfica del páncreas. El corte transverso muestra las porciones anatómicas (H: cabeza, B: cuerpo, T: cola), vasculares y estructuras adyacentes (A: aorta, V: cava, M: arteria mesentérica; P: vena porta, arteria gastroduodenal (*flecha*), C: colédoco, S: estómago, L: hígado).



2. Adenocarcinoma pancreático. El corte transverso muestra una pequeña masa hipoecoica en la cabeza pancreática (*flechas*), con dilatación del conducto de Wirsung (W) y dilatación del colédoco (*no se muestra*). P: vena porta.

El conducto principal pancreático, o de Wirsung, se origina de la unión de pequeños conductos en los lóbulos de la cola. Aparece en la ultrasonografía dibujando una línea delgada hipoecoica —el eco de la señal es ahí más débil—, con dos márgenes ecogénicos, más reflectantes. Su tamaño no debería pasar de entre 3 y 5 mm.

Las aplicaciones clínicas más frecuentes de la ultrasonografía pancreática son la pancreatitis aguda —con sus complicaciones—, la pancreatitis crónica, el adenocarcinoma, los tumores endocrinos, los tumores quísticos, el linfoma y la metástasis.

A pesar de que el páncreas puede aparecer normal en la pancreatitis aguda, los signos más frecuentes de esta enfermedad son el agrandamiento y la disminución difusa de la ecogenicidad normal del páncreas. Los US detectan bien las complicaciones (colecciones líquidas, seudoquiste, absceso, necrosis infectada y hemorragia). En la pancreatitis aguda y en la crónica se pueden ver también complicaciones como los seudoaneurismas y la trombosis venosa.

Los signos más importantes de la pancreatitis crónica son la dilatación del conducto de Wirsung, las calcificaciones intraductales y los seudoquistes. La sensibilidad global de los US está entre el 60 % y el 70 %. Existe un consenso general de que la primera técnica a utilizar en el diagnóstico de esta enfermedad debe ser los US, aunque a veces hay que confirmar la sospecha de patología con la tomografía computarizada y la resonancia magnética.

El 90 % de los tumores pancreáticos son adenocarcinomas ductales y sólo del 10 al 15 % son potencialmente resecables en el momento de su diagnóstico. La sensibilidad de los US en su detección va del 72 % al 98 %; no llega al diez por ciento el porcentaje de falsas detecciones. (La tomografía computarizada es más sensible que los US.) El adenocarcinoma pancreático es más frecuente en la cabeza del páncreas (65 %). Suele presentarse como una masa sólida hipoecoica (*figura 2*). Todos los demás tumores (neuroendocrinos, quísticos, linfoma y metástasis) representan solamente entre el 10 % y el 15 % de los casos.

A pesar de que los US presentan ciertas limitaciones, algunos avances técnicos recientes, como los armónicos y la inversión del pulso, el *power-Doppler* y los nuevos contrastes endovenosos, permiten que los US puedan competir con la tomografía computarizada y la resonancia magnética. Estas innovaciones tecnológicas permiten, por una parte, disminuir los artefactos creados por la pared abdominal y obtener así una mejor imagen diagnóstica del páncreas. Por otra parte, el estudio Doppler y la incorporación de los contrastes ecográficos endovenosos de última generación, nos dan una información aproximada del comportamiento vascular del páncreas normal y de su patología, permitiendo realizar un estudio en las fases arterial, venosa y retardada, al igual que sucede con la tomografía computarizada y la resonancia magnética. En todo caso, hay algunos otros factores a considerar durante la realización de la exploración en cada paciente. Uno de los más importantes es la habilidad técnica de quien realice la exploración.

Antonio Martínez Noguera
Profesor titular de radiología,
Hospital de San Pablo
Departamento de medicina
Universidad Autónoma de Barcelona

El secreto de los crisoles de Hesse

Las propiedades de los crisoles manufacturados en la región alemana de Hesse, aclamadas desde la Edad Media, se deben a la mullita, un compuesto que no se descubrió hasta el siglo XX

Los crisoles son recipientes cerámicos que se emplean para llevar a cabo reacciones y procesos químicos a temperaturas elevadas. Un buen crisol debe ser refractario y resistente a tensiones mecánicas y ataques químicos. De lo contrario, el recipiente se funde o se fractura durante el uso, lo que conlleva el fracaso del experimento.

Desde la Edad Media, los crisoles manufacturados en la región alemana de Hesse han gozado de predicamento entre alquimistas, químicos, ensayadores, acuñadores de moneda y otros especialistas metalúrgicos. Se utilizaban para fundir metales, analizar minerales o incluso realizar experimentos en busca de la piedra filosofal. La fama de esos crisoles era tal, que se les atribuían propiedades misteriosas.

Numerosos alfares trataron de imitar la calidad de los crisoles de Hesse, pero siempre fracasaron. La forma característica de los mismos, una boca triangular con tres picos vertedores, era fácil de reproducir. Su resistencia a las agresiones físicas y químicas, en cambio, parecía inigualable. En nuestro laboratorio hemos descubierto que el secreto de los crisoles de Hesse reside en la mullita, un silicato de aluminio que no se identificó hasta el siglo XX.

Análisis previos de crisoles hallados en yacimientos arqueológicos de varios países nos permitieron demostrar sobre el terreno la histórica popularidad de estos instrumentos. Constatamos su presencia, al menos desde el siglo XV, en Escandinavia, Gran Bretaña, Portugal y la América colonial, entre otros paises. Pero una pregunta clave permanecía sin resolver: ¿cuál era el secreto de los cri-

soles de Hesse? ¿A qué debían su excelente calidad?

En primer lugar, cabe destacar que la matriz cerámica de los crisoles de Hesse exhibe una concentración de óxido de aluminio excepcionalmente elevada (37 por ciento en masa) y un contenido en óxidos alcalinos y alcalinotérreos muy reducido (tan sólo un 2 por ciento). Tal composición química revela el empleo de arcillas caoliníticas de poderosa resistencia térmica. Asimismo, las pastas contienen una notable concentración de granos de cuarzo (entre un 20 y un 40 por ciento en volumen), resultado de mezclar la arcilla con una arena cuarcítica de gran pureza. Las inclusiones no plásticas en general, y el cuarzo en particular, incrementan de forma notable la resistencia de las cerámicas a impactos mecánicos o térmicos. Ello explicaría que un crisol de Hesse sea menos susceptible de fracturarse cuando se manipula o se extrae del horno estando todavía caliente.

Con todo, esos factores no bastan para justificar la reputación de los crisoles, pues crisoles fabricados en otros talleres presentan propiedades similares. Una etapa clave en la manufactura de los crisoles de Hesse —que los diferencia de cualquier otro competidor— era la cocción a temperaturas elevadas en el horno del alfar. Análisis por microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X de varios crisoles muestran una vitrificación completa de la matriz cerámica, así como la presencia de mullita y cristobalita, probablemente recristalizadas tras la descomposición de la caolinita a temperaturas superiores a 1300 ºC. Esas temperaturas de cocción eran excepcionales para cualquier otra cerámica de ese período.

La cocción de los crisoles a temperaturas tan elevadas, y durante un período prolongado, servía de control de calidad de los crisoles antes de su comercialización. Más importante todavía, las altas temperaturas desencadenaban la formación en la matriz cerámica de un silicato de aluminio, la mullita ($Al_6Si_2O_{13}$), que esconde el verdadero secreto de las cerámicas de Hesse.

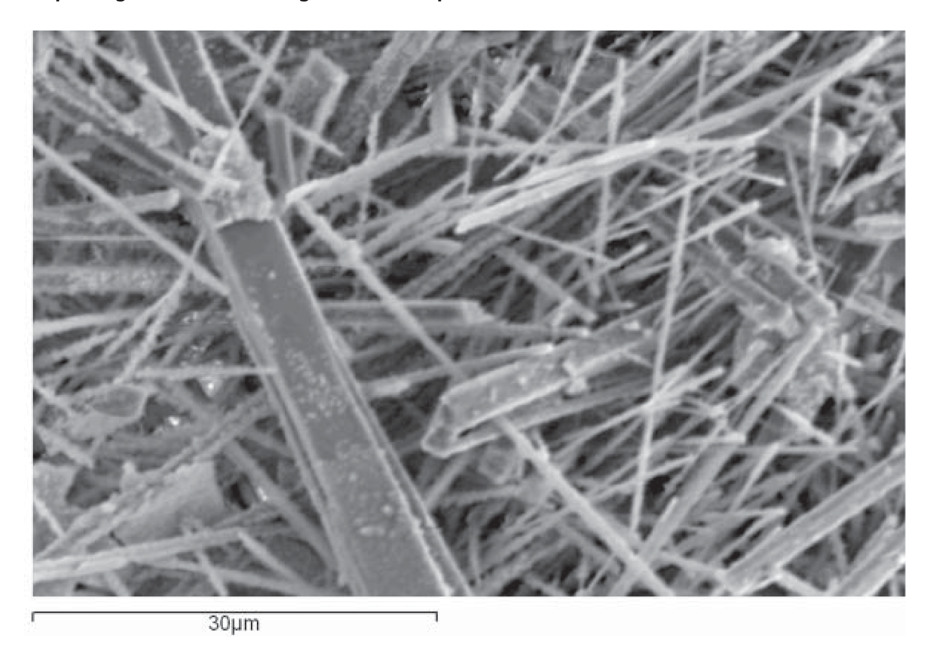
En la actualidad, la mullita se utiliza en un amplio abanico de cerámicas: materiales de construcción, materiales ópticos, conversores catalíticos, sistemas de protección térmica, motores de turbina de gas para aviones, etcétera. Entre las propiedades de la mullita destacan una baja expansión térmica (que se corresponde con una singular resistencia al impacto térmico), una poderosa resistencia también a la fluencia, refractariedad a temperaturas elevadas y una estabilidad magnífica en entornos químicos agresivos.

La mullita se identificó y describió en el siglo XX. En la actualidad sigue empleándose en la fabricación de crisoles. Sin embargo, los fabricantes de crisoles de Hesse ya explotaban las propiedades de este silicato de aluminio varios siglos antes de su descubrimiento: mediante la cocción, a temperaturas superiores a 1300 ºC, de arcillas caoliníticas muy depuradas, obtenían un producto inigualable en el mercado. La presencia en la matriz cerámica de una red de pequeñísimos cristales aciculares de mullita confería a los crisoles las propiedades ideales para soportar las tensiones térmicas, químicas y mecánicas a las que les sometían durante su uso.

El descubrimiento de nuevos elementos y sus propiedades termoquímicas fue posible merced a crisoles como los de Hesse. Sin recipientes resistentes y estandarizados, de comportamiento predecible y que permitían repetir experimentos y reproducir resultados, no tendríamos la química analítica actual.



1. Grupo de crisoles triangulares recuperados por H-G. Stephan en un yacimiento arqueológico de Hesse. Fotografía de S. Häpe.



2. Pasta cerámica de un crisol de Hesse (microscopía electrónica de barrido a 2000 aumentos). Se observan innumerables agujas de mullita entrelazadas, que ofrecen una extraordinaria resistencia a agresiones térmicas y químicas.

Marcos Martinón Torres
Instituto de Arqueología
University College London

Rebote del universo



Nuestro universo pudo haber comenzado no en una gran explosión, sino en un gran rebote, una implosión que dio paso a una explosión, todo ello ocasionado por exóticos efectos cuánticos y gravitatorios

Martin Bojowald

Los átomos representan ahora una idea tan común, que resulta difícil imaginar cuán extraños parecían en su día. Cuando se enunció la hipótesis de los átomos, no se pensaba que se pudiera observar algo tan sutil. Muchos cuestionaron si podía en verdad considerarse científico semejante concepto de átomo. Con el tiempo, las pruebas de su existencia se fueron acumulando. El punto de inflexión llegó con el análisis que Einstein hizo en 1905 del movimiento browniano, el vaivén aleatorio de los granos de polvo en un fluido. Con todo, hubo que esperar 20 años más para contar con una teoría que explicara los átomos —la mecánica cuántica— y otros 30 años para que Erwin Müller obtuviera sus primeras imágenes microscópicas. Hoy, industrias enteras dependen de las propiedades y características de la materia atómica.

El conocimiento que los físicos tienen del espacio y el tiempo recorre ahora un camino parecido,



aunque unos pasos por detrás. Al igual que el comportamiento de los materiales indica que están formados por átomos, el comportamiento del espacio y el tiempo induce a pensar que también ellos tienen una estructura fina, un mosaico de "átomos" del espaciotiempo o alguna otra "filigrana". Los átomos de la materia son las unidades indivisibles más pequeñas de los compuestos químicos; análogamente, los hipotéticos átomos del espacio serían las unidades indivisibles de la distancia. En general, se les atribuye un tamaño de 10^{-35} metros, demasiado diminutos para ser vistos hoy día con los instrumentos más potentes, que sólo exploran distancias de 10^{-18} metros. En consecuencia, muchos se preguntan si el concepto de espaciotiempo merece la consideración de científico. Otros investigadores no se arredran y proponen posibles maneras de detectar esos átomos de forma indirecta.

La vía más prometedora consiste en observar el cosmos. Si rebobinásemos la expansión del universo, las galaxias que hoy vemos convergerían hacia un punto infinitesimal: la singularidad de la gran explosión. En este punto, según nuestra teoría actual de la gravedad —la teoría de la relatividad general de Einstein—, el universo conoció una densidad y temperaturas infinitas. De ese momento de la historia, se suele decir que fue el nacimiento de la materia, del espacio y del tiempo. Tal interpretación, sin embargo, va demasiado lejos, puesto que los valores infinitos sugieren que la propia relatividad general deja de funcionar. Para explicar lo que en realidad sucedió en la gran explosión, hay que superar la relatividad. Debemos elaborar una teoría cuántica de la gravedad que incorpore la estructura fina del espaciotiempo, ante la cual la relatividad está ciega.

Los detalles de la estructura fina entraron en el juego bajo las densas condiciones del universo primordial. Algunas trazas podrían haber sobrevivido en la manera en que la materia y la radiación se disponen hoy día. En resumen, si el átomo del espaciotiempo existe, no se necesitarán siglos para hallar las pruebas, como ocurrió con los átomos materiales. Con algo de suerte, podríamos saberlo de aquí a diez años.

Trocitos de espacio

Se han ideado varias teorías cuánticas de la gravedad, que aplican los principios cuánticos a la relatividad general de manera distinta. Mi trabajo se centra en la teoría de la gravedad cuántica de bucles ("gravedad de bucles", para abreviar), desarrollada en dos pasos en los años noventa. En primer lugar, se reformuló matemáticamente la relatividad general para que se pareciese a la teoría clásica del electromagnetismo; los "bucles" son análogos a las líneas de los campos magnéticos y eléctricos. En segundo lugar, siguiendo procedimientos innovadores, parecidos a los de las matemáticas de los nudos, se aplicaron los principios cuánticos a los bucles. La teoría cuántica de la gravedad resultante predice la existencia de los átomos del espaciotiempo *[véase* "Atomos del espacio y tiempo", por Lee Smolin; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 2004].

Otros enfoques, como la teoría de cuerdas y la llamada triangulación dinámica causal, no predicen los átomos del espaciotiempo en sí mismos, pero sugieren otras alternativas en las que las distancias muy pequeñas podrían ser indivisibles [*véase* "La gran montaña rusa del cosmos", por Cliff Burgess y Fernando Quevedo; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2008; y "El universo cuántico autoorganizado", por Jan Ambjorn, Jerzy Jurkiewicz y Renate Loll; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2008]. Las diferencias entre estas teorías han ocasionado controversias. En mi opinión, son más complementarias que contradictorias. La teoría de cuerdas, por ejemplo, resulta muy útil para tener una visión unificada de las interacciones entre partículas, incluida la gravedad cuando es débil. Con el propósito de sacar a la luz lo que sucede en las singula-



CONCEPTOS BASICOS

- La teoría general de la relatividad de Einstein afirma que el universo empezó en la singularidad de la gran explosión, momento en que toda la materia que vemos estaba concentrada en un punto de densidad infinita. Pero esta teoría no tiene en cuenta la estructura fina, cuántica, del espaciotiempo, que limita el grado en que puede estar concentrada la materia y la intensidad de la gravedad. Para saber con certeza lo que ocurrió, se necesita una teoría cuántica de la gravedad.
- De acuerdo con una de las varias teorías propuestas, la gravedad cuántica de bucles, el espacio está dividido en "átomos" de volumen y tiene una capacidad de almacenamiento de la materia y la energía finitas, lo que impide la existencia de cualquier singularidad.
- De ser así, el tiempo podría haber existido antes de la explosión. El universo precedente a la explosión quizá sufriese una implosión catastrófica que alcanzó un punto de máxima densidad y después revirtió. En resumen: una gran contracción pudo haber provocado un gran rebote y una gran explosión.

LA TEORIA ACABA DE EXPLOTAR

La idea de la gran explosión se debe a un simple hecho observado: las galaxias se alejan unas de otras. Si este movimiento diera marcha atrás en el tiempo, a lo largo de unos 13.700 millones de años, todas esas galaxias (o sus precursoras) aparecerían apiñadas. La teoría de la relatividad general de Einstein predice que se acumularían en un punto de densidad infinita, la singularidad de la gran explosión. Pero una densidad infinita es algo irreal: que sea una predicción de la teoría de la relatividad general es síntoma de que no es completa.

Singularidad de la gran explosión
Densidad
Tiempo

ridades, cuando la gravedad es muy intensa, las construcciones atómicas de la gravedad de bucles ofrecen ventajas.

El verdadero poder de la teoría reside en su capacidad para incorporar la fluidez del espaciotiempo. En su perspicacia, Einstein se percató de que el espaciotiempo no era un mero escenario donde se desarrollaba el drama del universo, sino un actor importante del reparto. No sólo determina el movimiento de los cuerpos dentro del universo, sino que además evoluciona. Existe una complicada relación entre la materia y el espaciotiempo. El espacio puede aumentar y disminuir.

La gravedad de bucles traslada esta imagen al reino cuántico. Adopta lo que ya sabemos de las partículas materiales y lo aplica a los átomos del espacio y del tiempo, proporcionando un modelo unificado de los conceptos básicos. Por ejemplo, la teoría cuántica del electromagnetismo describe el vacío como una carencia de partículas —de fotones—: cada incremento de energía añadido a este vacío genera una nueva partícula. En la teoría cuántica de la gravedad, el vacío es la ausencia de espaciotiempo, una soledad tan absoluta, que no podemos ni imaginárnosla. La gravedad de bucles describe cómo cada incremento de energía añadida a este vacío genera un nuevo átomo de espaciotiempo.

Los átomos del espaciotiempo forman una malla densa, en cambio incesante. A grandes distancias, su dinámica da lugar a la evolución del universo conforme a la relatividad general. En condiciones normales nunca apreciaremos esos átomos del espaciotiempo; el espaciado dentro de la malla es tan angosto, que se parece a un continuo. Pero cuando el espaciotiempo está abarrotado de energía, como ocurrió en la gran explosión, la estructura fina del espaciotiempo constituye un factor a tener en cuenta y las predicciones de la teoría de la gravedad de bucles difieren de las de la relatividad general.

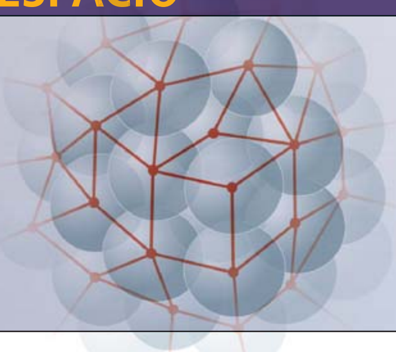
Atracción por la repulsión

Aplicar la teoría es una tarea harto difícil, por lo que mis colaboradores y yo empleamos versiones simplificadas que incorporan las propiedades verdaderamente esenciales del universo, como su tamaño, e ignoramos los detalles de menor interés. Además, hemos tenido que adaptar muchas de las herramientas matemáticas comunes de la física y la cosmología.

El universo se suele describir por medio de ecuaciones diferenciales que detallan el estado de las variables físicas, como la densidad, en cada uno de los puntos del continuo espaciotemporal. Pero con un espaciotiempo granuloso empleamos ecuaciones de diferencias, que rompen el continuo en intervalos discretos. Las ecuaciones describen cómo asciende el universo por la escala de tamaños que le están permitidos en su crecimiento. Cuando empecé a analizar las implicaciones cosmológicas de la

LOS ATOMOS DEL ESPACIO

La teoría de la relatividad tiene problemas porque presupone que el espacio es un continuo. La teoría de la gravedad cuántica de bucles sostiene que el espacio es una malla de pequeños "átomos" (*esferas*). El diámetro de estos átomos (*líneas*) se corresponde con la longitud de Planck, la distancia en la que los efectos gravitatorios y cuánticos son de intensidad equiparable.



SAMUEL VELASCO 5W *Infographics*

gravedad de bucles en el año 1999, la mayoría de los investigadores pensaba que las ecuaciones de diferencias reproducirían, disfrazados, los viejos resultados. Pronto, sin embargo, manifestaron propiedades nuevas.

La gravedad, en las circunstancias que conocemos, es una fuerza de atracción. Una bola de materia tiende a derrumbarse sobre sí misma bajo su propio peso y, si su masa adquiere tamaño suficiente, la gravedad sobrepasará a las demás fuerzas y comprimirá la bola hasta convertirla en una singularidad, como las que hay en el centro de los agujeros negros. Pero la gravedad de bucles sugiere que la estructura atómica del espaciotiempo modifica la naturaleza de la gravedad a densidades de energía muy altas y la convierte en repulsiva. Imaginemos el espacio como una esponja, y la masa y la energía como el agua. La esponja porosa puede almacenar agua en sus poros, pero sólo hasta cierta cantidad. Una vez llena, la esponja deja de absorber más agua, la repele. De igual manera, el espacio cuántico atómico es poroso, con una capacidad finita de almacenar la energía. Cuando las densidades energéticas son demasiado grandes, aparecen las fuerzas de repulsión. El espacio continuo de la relatividad general, por el contrario, puede almacenar cantidades ilimitadas de energía.

Debido al cambio cuántico gravitatorio del balance de fuerzas, no puede aparecer ninguna singularidad, ningún estado de densidad infinita. Según este modelo, la materia del universo temprano tuvo una densidad, aunque enorme, finita y equivalente a un billón de soles en el tamaño de un protón. En situaciones tan extremas, la gravedad actuó de modo repulsivo y expandió el espacio. A medida que la densidad se relajaba, la gravedad pasó a ser la fuerza de atracción que todos conocemos. La inercia ha mantenido la expansión hasta hoy.

La gravedad repulsiva provocó la expansión del espacio a un ritmo acelerado. Las observaciones cosmológicas parecen necesitar este período de aceleración, o inflación cósmica. Mientras el universo se expande, la fuerza que dirige la inflación se va atemperando. Acabada la aceleración, el excedente de energía se transfiere a la materia ordinaria, que comienza a llenar el universo, en un proceso de recalentamiento. En los modelos actuales, la inflación es un añadido *ad hoc*, un añadido para ajustar las observaciones; en cambio, en la teoría de la cosmología cuántica de bucles la inflación es una consecuencia natural de las propiedades atómicas del espaciotiempo. La aceleración ocurre de forma automática cuando el universo es pequeño y su naturaleza porosa todavía cuenta.

El tiempo antes del tiempo

Sin una singularidad que marque el comienzo del tiempo, la historia del universo podría remontarse mucho más atrás en el pasado de lo que los cosmólogos hayan pensado. Otros físicos han alcanzado conclusiones parecidas [*véase* "El universo antes de la gran explosión", por Gabriele Veneziano; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2004], pero sus modelos no resuelven el problema de la singularidad; la mayoría de los modelos, incluidos los de la teoría de cuerdas, necesitan suponer qué pudo haber ocurrido en ese incómodo momento. La gravedad de bucles, por el contrario, sabe rastrear lo que aconteció en la singularidad. Los modelos de bucles, si bien simplificados, se basan en principios generales y evitan introducir hipótesis *ad hoc*.

Podemos intentar reconstruir el pasado más lejano con las ecuaciones de diferencias. Una situación posible es que el estado inicial de alta densidad fuese consecuencia del colapso de un universo preexistente bajo la acción de una fuerza gravitatoria de atracción. La densidad crecería tanto, que la gravedad cambiaría a repulsiva, y el universo se expandiría de nuevo. A semejante proceso los cosmólogos le llaman rebote.

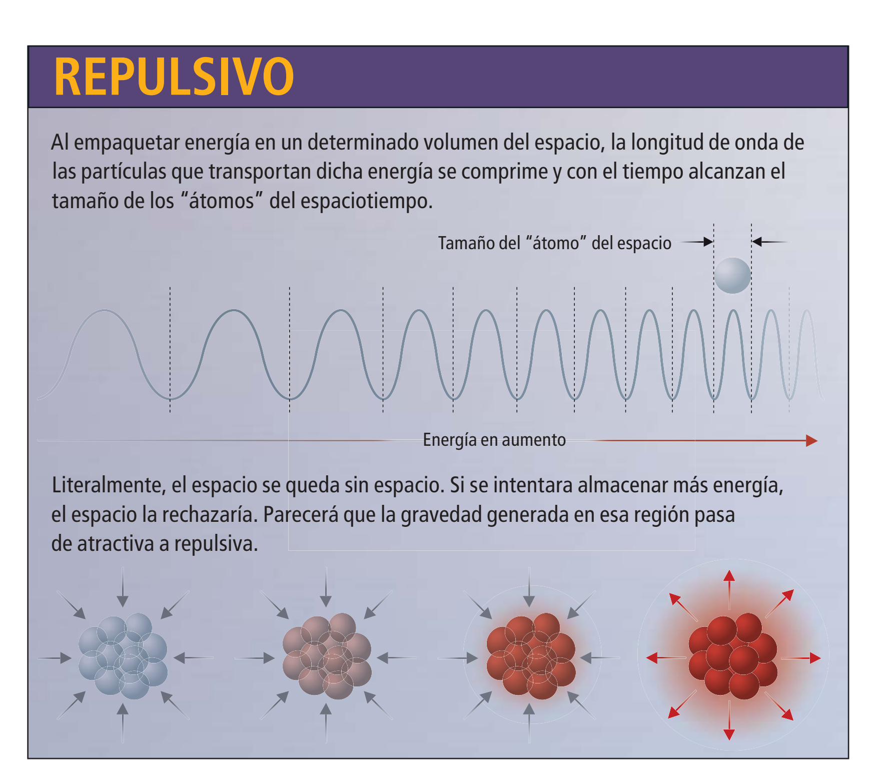
El primer modelo de rebote investigado consistió en un caso ideal con un universo muy simétrico y dotado de sólo un tipo de materia. Las partículas no tenían masa, ni interactuaban entre ellas. A pesar de la simplicidad, para entender este modelo hubo que recurrir a una serie de simulaciones numéricas que Abhay

El autor

Martin Bojowald es el investigador más destacado de las implicaciones de la gravedad cuántica de bucles en cosmología. Es miembro del Instituto para el Cosmos y la Gravitación de la Universidad estatal de Pennsylvania.

REPULSIVO

Al empaquetar energía en un determinado volumen del espacio, la longitud de onda de las partículas que transportan dicha energía se comprime y con el tiempo alcanzan el tamaño de los "átomos" del espaciotiempo.



Literalmente, el espacio se queda sin espacio. Si se intentara almacenar más energía, el espacio la rechazaría. Parecerá que la gravedad generada en esa región pasa de atractiva a repulsiva.

SAMUEL VELASCO 5W Infographics



LOS ASTRONOMOS pueden buscar la huella de los átomos del espaciotiempo en analogía al movimiento browniano aleatorio.

Ashtekar, Tomasz Pawlowski y Parampreet Singh, de la Universidad estatal de Pennsylvania, completaron en 2006. Estudiaron la propagación de las ondas que representaban al universo tanto antes como después de la gran explosión. El modelo mostró sin ambages que una onda no sigue ciegamente la trayectoria clásica hacia el abismo de la singularidad, sino que se para y retrocede una vez que entra en juego la gravedad cuántica de la repulsión.

Un resultado muy interesante de estas simulaciones fue el silencio de la incertidumbre característica de la mecánica cuántica durante el rebote. La onda permanece siempre localizada a lo largo del rebote y no se dispersa, que es lo que normalmente haría una onda cuántica. El resultado parecía sugerir que el universo anterior al rebote podría parecerse al nuestro: lo gobernaría la relatividad general y quizás estaría repleto de estrellas y galaxias. De ser así, deberíamos poder extrapolar nuestro universo al pasado, a través del rebote, y deducir qué pasó antes, de la misma manera que podemos reconstruir los caminos descritos por miles de bolas antes de una colisión estudiando los recorridos tras el choque. No necesitamos conocer todos y cada uno de los detalles de la colisión a escala atómica.

Mi análisis posterior hizo añicos esta esperanza. Una desgracia. El modelo y las ondas cuánticas utilizadas en las simulaciones numéricas resultaron ser un caso especial. En general, encontré que las ondas sí se dispersan y los efectos cuánticos son muy fuertes y han de ser tenidos en cuenta. Así que el rebote no fue un breve empuje de una fuerza repulsiva, como un choque de bolas de billar. Consistiría en la aparición de nuestro universo a partir de un estado cuántico casi insondable, un mundo en agitación muy fluctuante. Aun cuando el universo preexistente se hubiera parecido alguna vez al nuestro, habría tenido que atravesar un largo periodo en el que las densidades de materia y energía cambiasen mucho y aleatoriamente, embarullándolo todo.

Las fluctuaciones preexistentes a la gran explosión no guardan especial relación con las subsiguientes. Antes de la gran explosión, el universo pudo haber estado fluctuando de manera muy diferente de como lo haría después, sin que esos detalles sobreviviesen al rebote. En breve, el universo padece de amnesia. Aunque haya existido antes de la gran explosión, los efectos cuánticos activos durante el rebote habrían aniquilado en la práctica casi todo rastro de su prehistoria.

Algunos atisbos de memoria

Esta imagen de la gran explosión es más sutil que la visión clásica de la singularidad. Mientras que la relatividad general falla en la singularidad, la gravedad cuántica de bucles puede manejar las condiciones extremas que sucedieron allí. La gran explosión deja de ser un comienzo físico o una singularidad matemática, pero impone una limitación práctica a nuestro conocimiento. Cualquier cosa que sobreviviese a la gran explosión no proporcionaría una visión completa de lo que existió antes.

A pesar de lo frustrante que pueda parecer, se trata de una bendición conceptual. En los sistemas físicos, el desorden tiende a crecer. Este principio, la segunda ley de la termodinámica, representa un argumento en contra

SAMUEL VELASCO 5W *Infographics* (*gran explosión*); SLIM FILMS (*satélite*)

LA EXPLOSION

Al limitar la cantidad de energía que se puede almacenar en el espacio, la gravedad cuántica de bucles reemplaza la singularidad de la gran explosión por un rebote formidable, un proceso que parece un comienzo aunque en realidad refleja una transición entre un estado anterior y otro nuevo. El rebote pone en marcha la expansión del universo.

Gran rebote

Densidad

Tiempo

Una posibilidad: el universo es eterno, implosionó, alcanzó la máxima densidad permitida (en el rebote) y explotó de nuevo.

de un universo eterno. Si el orden hubiera decrecido durante un intervalo infinito de tiempo, el universo debería estar ahora tan desorganizado, que las estructuras que vemos en las galaxias y en la Tierra resultarían casi imposibles. La cantidad justa de amnesia cósmica viene al rescate, al mostrarle al joven universo en crecimiento un borrón y cuenta nueva del desorden que pudo haber habido antes.

De acuerdo con la termodinámica tradicional no existe un verdadero borrón y cuenta nueva; todo sistema retiene siempre una memoria de su pasado en la configuración de los átomos [*véase* "El origen cósmico de la flecha del tiempo", por Sean M. Carroll; Investigación y Ciencia, agosto de 2008]. Pero al permitir que el número de los átomos de espaciotiempo cambie, la gravedad cuántica de bucles le asigna al universo mayor libertad en la limpieza que la física clásica.

Todo lo anterior no quiere decir que los cosmólogos deban perder la esperanza de sondear el período cuántico-gravitatorio. Las ondas gravitatorias y los neutrinos son herramientas prometedoras, pues apenas interactúan con la materia y, por tanto, penetraron en el plasma primordial con una pérdida mínima. Estos mensajeros podrían traer noticias de un tiempo próximo a la gran explosión, si no anterior.

Una forma de buscar las ondas gravitatorias es el estudio de su huella en la radiación del fondo cósmico de microondas [*véase* "Ecos de la Gran Explosión", por Robert R. Caldwell y Marc Kamionkowski; Investigación y Ciencia, marzo de 2001]. Si la gravedad cuántica repulsiva causó la inflación cósmica, las observaciones de las ondas gravitatorias deberían llevar consigo la huella. Los teóricos, además, deben determinar si esta nueva fuente de inflación es capaz de reproducir otras medidas cosmológicas, sobre todo las relacionadas con la distribución temprana de la densidad de materia que se observa en el fondo de microondas cósmico.

Al mismo tiempo, los astrónomos pueden buscar análogos del espaciotiempo en el movimiento aleatorio browniano. Por ejemplo, las fluctuaciones cuánticas del espaciotiempo podrían afectar a la propagación de la luz a largas distancias. De acuerdo con la teoría de la gravedad de bucles, una onda de luz no puede ser un continuo; debe adaptarse al entramado del espacio. Cuanto más corta sea la longitud de onda, mayor será la distorsión provocada por el entramado. En cierto sentido, los átomos del espaciotiempo zarandean la onda. En consecuencia, luces de longitudes de onda diferentes viajan a velocidades diferentes. Aunque la diferencia sea diminuta, se acumularía durante un largo viaje. Las fuentes lejanas, las explosiones de rayos gamma por ejemplo, ofrecen la mejor esperanza de observar este fenómeno [*véase* "Una ventana abierta a los confines del universo", por William B. Atwood, Peter F. Michelson y Steven Ritz; Investigación y Ciencia, febrero de 2008].

En el caso de los átomos de materia, transcurrieron más de 25 siglos entre las especulaciones de los presocráticos acerca de su existencia y los estudios de Einstein del movimiento browniano, que probaron que los átomos son la base de la ciencia experimental. No se espera un lapso temporal tan largo para los átomos del espaciotiempo.

Superposición cuántica

Densidad

Tiempo

O bien: antes del gran rebote, el universo pudo haber existido en un estado cuántico inimaginable, no semejante al espacio todavía, cuando algo provocó el gran rebote y la formación de los átomos del espaciotiempo. Cuál de estas alternativas ocurrió, depende de detalles sobre los que se sigue investigando.

Espejo, espejo

A pesar de los efectos que enmarañaron el universo durante el gran rebote, cabe proponer algunas hipótesis autorizadas acerca de lo que hubo antes. Algunas realmente extrañas. Por ejemplo, las ecuaciones de diferencias de la gravedad cuántica de bucles predicen que la región del espaciotiempo que precedió al rebote era una imagen especular de nuestro universo. Es decir, que lo que ahora es a derechas entonces era a izquierdas, y viceversa.

Para visualizar este efecto, imagínese un globo que se desinfla y que, en vez de terminar como un mustio trozo de goma, conservara su momento y energía. La goma, una vez en movimiento, tiende a seguir en movimiento, por lo que a medida que el globo se contrae hasta un tamaño mínimo se da la vuelta de dentro afuera y crece de nuevo. Lo que antes era el exterior del globo ahora es el interior, y viceversa. De igual manera, cuando los átomos del espaciotiempo se cruzan entre sí en el gran rebote, el universo se da la vuelta.



Esta inversión es interesante porque las partículas elementales no tienen una simetría especular perfecta; ciertos procesos cambian al modificar la orientación. Tal asimetría debe tomarse en cuenta para comprender lo que le ocurrió a la materia en el rebote.

LILA RUBENSTEIN (*globos*)

Bibliografía complementaria

QUANTUM GRAVITY. Carlo Rovelli. Cambridge University Press, 2004.

WHAT HAPPENED BEFORE THE BIG BANG? Martin Bojowald en *Nature Physics*, vol. 3, n.º 8, págs. 523-525; agosto, 2007.

LOOP QUANTUM COSMOLOGY. Martin Bojowald en *Living Reviews in Relativity*, vol. 11, n.º 4; 2 julio, 2008.

OBSERVACION Y CONTROL DEL CEREBRO

Una combinación de óptica y genética permite cartografiar y controlar, con precisión inaudita, los circuitos cerebrales

Gero Miesenböck

CONCEPTOS BASICOS

- El estudio de la función cerebral se ha basado tradicionalmente en la estimulación de neuronas aisladas y el registro de su actividad mediante electrodos. Pero este método indirecto dificulta el análisis de neuronas específicas.
- El emergente campo de la optogenética, que combina la óptica con la ingeniería genética para observar y controlar grupos de neuronas, permite escudriñar circuitos neuronales, un enfoque que revolucionará el estudio de la función cerebral.

En 1937, Sir Charles Scott Sherrington, de la Universidad de Oxford, concibió lo que se convertiría en la representación clásica de las funciones cerebrales. Imaginó puntos de luz que señalaban la actividad de las células nerviosas y sus conexiones. Durante el sueño profundo, brillarían sólo algunas zonas remotas del cerebro, como estrellas que centellearan en la noche. El estado de vigilia, en cambio, guardaría semejanza con una suerte de Vía Láctea en desenfrenada danza cósmica. "De forma gradual, la masa encefálica se convierte en un mágico telar donde millones de lanzaderas tejen un patrón efímero, siempre con significado pero nunca persistente: una cambiante armonía de formas."

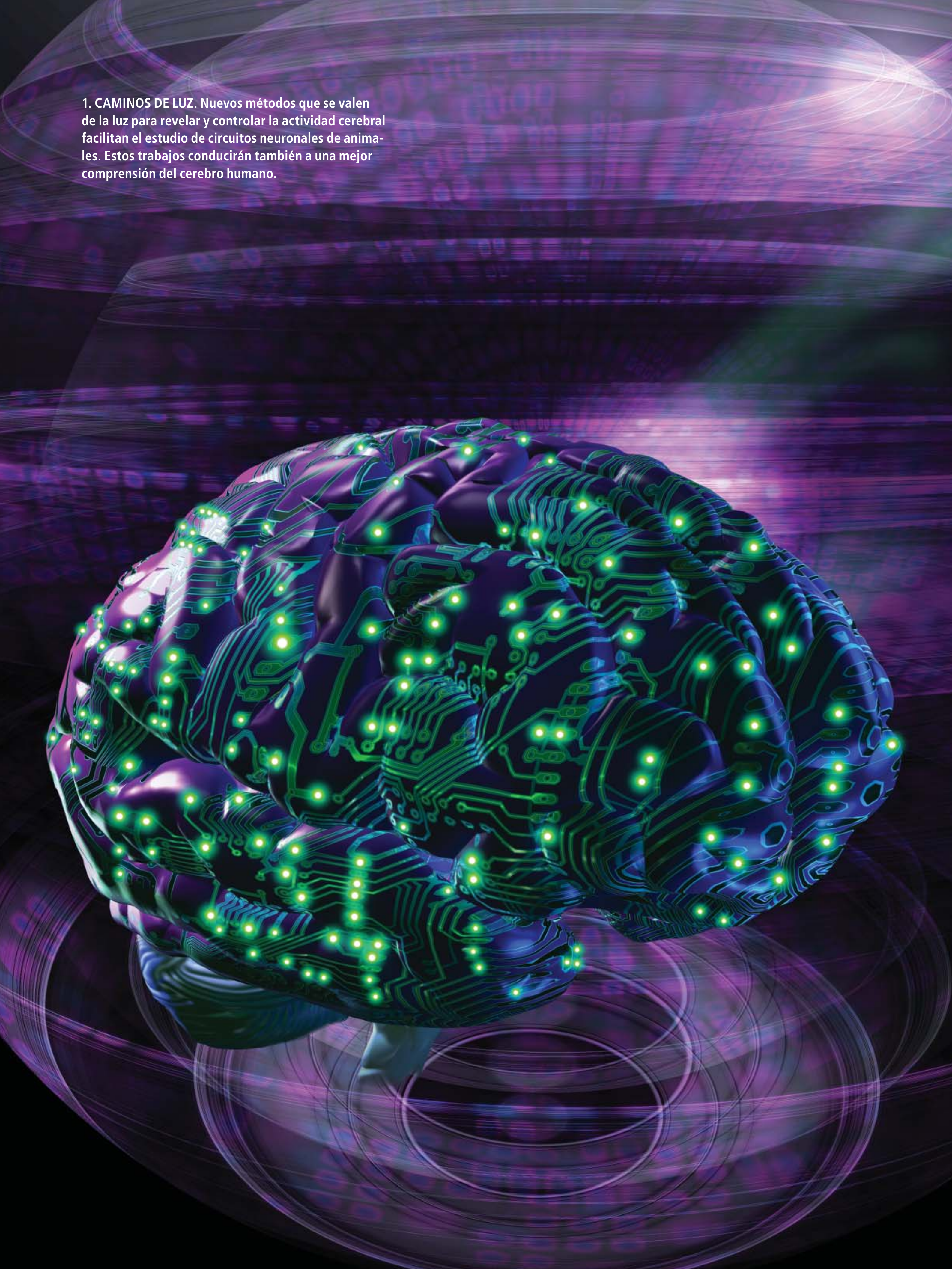
Aunque Sherrington no lo advirtiera entonces, su poética metáfora encerraba una idea científica de suma importancia: la posibilidad de desentrañar por medios ópticos el funcionamiento interno del cerebro. Comprender el modo en que se interrelacionan las neuronas para generar pensamientos y conductas sigue siendo uno de los más difíciles problemas irresueltos de la biología. Ello se debe, en gran parte, a que no podemos ver la totalidad de los circuitos neuronales en acción. Los métodos al uso para sondear mediante electrodos una o dos neuronas revelan sólo minúsculos fragmentos de un rompecabezas mucho más amplio, en el que faltan demasiadas piezas para completar el cuadro. Mas si fuera posible observar la comunicación neuronal, tal vez de ahí deduciríamos la configuración y el modo de operación de los circuitos cerebrales. Tan sugestiva idea ha inspirado tentativas de materializar la visión de Sherrington.

De tales intentos ha nacido una nueva especialidad: la optogenética. En ella se combina la ingeniería genética con la óptica para estudiar tipos específicos de células. Ha facilitado la visualización de las funciones de diversos grupos de neuronas e incluso el control a distancia de las neuronas (mediante el simple accionamiento de un interruptor luminoso). Quizá la optogenética descubra algún día a los neurocientíficos la circuitería cerebral y facilite a los médicos el tratamiento de ciertos trastornos.

Pigmentos electrosensibles

Los intentos de hacer realidad la visión de Sherrington comenzaron en el decenio de los setenta del siglo pasado. A semejanza de los ordenadores digitales, el sistema nervioso opera mediante impulsos eléctricos en los que se transmite información codificada por las neuronas. Esos impulsos, de voltaje inferior a la décima parte de una pila AA, inducen en una neurona la liberación de neurotransmisores, que activan o inhiben las neuronas conectadas en un circuito. En un intento de

ALFRED T. KAMAJIAN



1. CAMINOS DE LUZ. Nuevos métodos que se valen de la luz para revelar y controlar la actividad cerebral facilitan el estudio de circuitos neuronales de animales. Estos trabajos conducirán también a una mejor comprensión del cerebro humano.

El autor

Gero Miesenböck ocupa la cátedra Waynflete de fisiología en la Universidad de Oxford. En la misma tuvo un notable precedente, Charles Sherrington, uno de los fundadores de la neurociencia moderna.

hacer visibles esas señales eléctricas, Leonard B. Cohen, de la Universidad de Yale, ensayó un gran número de pigmentos fluorescentes que respondían a los cambios de voltaje con cambios de color o de brillo. Descubrió que algunos colorantes eran "electrosensibles": sus propiedades ópticas variaban en función del voltaje. Mediante la tinción de las neuronas con tales sustancias podría, pues, observarse la actividad de éstas al microscopio.

Los pigmentos revelan la excitación neuronal no sólo cuando ésta se produce por cambios de voltaje, sino también cuando se debe al flujo de átomos dotados de carga eléctrica (iones). Cuando la neurona genera una señal de excitación, los canales de la membrana se abren y admiten iones de calcio hacia el interior de la célula. A su vez, el aflujo de calcio estimula la liberación de neurotransmisores. En 1980, Roger Y. Tsien, hoy en la Universidad de California en San Diego, comenzó a sintetizar pigmentos con capacidad de indicar, mediante cambios en la intensidad de la fluorescencia, variaciones de la concentración de calcio. Esos "reporteros" ópticos han resultado de extraordinario valor; han permitido ahondar en el procesamiento de la información en neuronas individuales y en redes de tamaño restringido.

Los pigmentos sintéticos adolecen, sin embargo, de un grave inconveniente. El tejido neuronal consta de células de varios tipos. Se estima que el cerebro de un ratón alberga cientos de tipos distintos de neuronas, amén de células soporte de muy diverso género. Dado que las interacciones entre tipos concretos de neuronas forman la base del procesamiento de la información nerviosa, el que quiera comprender el funcionamiento de un circuito particular deberá poder identificar y observar los participantes individuales, y señalar en qué momento se activan (generan un impulso eléctrico o potencial de acción) y se desactivan. Pero los pigmentos sintéticos tiñen toda clase de células sin distinción. No es posible, por tanto, determinar en qué tipo de célula se ha originado una señal óptica.

Genes y fotones

La optogenética nace al comprender que la manipulación de genes podría ser la clave para resolver el problema de la tinción indiscriminada. Todas las células de un individuo contienen los mismos genes. Lo que diferencia unas de otras es que en ellas se activan o desactivan distintas combinaciones de genes. Las neuronas que al excitarse liberan dopamina (neurotransmisor), por ejemplo, deben contar con un mecanismo enzimático que les permita elaborar y encapsular dicha sustancia. Los genes que codifican los componentes proteínicos de ese mecanismo se activan en las neuronas que sintetizan dopamina (dopaminérgicas), pero permanecen inactivos en otras neuronas que no la producen.

En teoría, si un interruptor biológico que ha activado un gen productor de dopamina estuviera vinculado a un gen codificador de un pigmento, y la unidad "interruptor-pigmento" se integrara en las células de un animal, éste produciría el pigmento sólo en las células dopaminérgicas. Si se escrutara el interior del cerebro de esos organismos (cosa perfectamente posible), se vería que las células dopaminérgicas funcionan virtualmente aisladas de los demás tipos de células. Asimismo, podría observarse esas células en un cerebro vivo e intacto. Los pigmentos sintéticos no logran tan mágico resultado, ya que su producción no está controlada por interruptores genéticos que se accionen exclusivamente en ciertos tipos de células. El proceso funciona

TIME & LIFE PICTURES/GETTY IMAGES (*experimento de Galvani*); BIBLIOTECA DEL CONGRESO/PHOTO RESEARCHERS, INC. (*Sherrington*); CORTESIA DE JOSE RODRIGUEZ DELGADO (*toro en la plaza*)



sólo cuando el pigmento lo codifica un gen: es decir, cuando el pigmento corresponde a una proteína.

Las primeras demostraciones de que los pigmentos de codificación genética revelaban la actividad neuronal llegaron hace diez años, aportadas por grupos dirigidos independientemente por Tsien y Ehud Y. Isacoff, de la Universidad de California en Berkeley, y yo mismo, con James E. Rothman, hoy en la Universidad de Yale. En todos los casos, tomamos el gen pigmentario de un organismo marino luminiscente: la medusa *Aequorea victoria*, que elabora la proteína verde fluorescente. (Tsien ha recibido este año, junto con Martin Chalfie y Osamu Shimomura, el premio Nobel de química por sus trabajos sobre esta proteína.)

Manipulamos ese gen para que produjera una proteína con capacidad para detectar y revelar los cambios en el voltaje o la concentración de calcio que subyacen bajo la señalización intracelular, así como la liberación de neurotransmisores que conforman la señalización intercelular.

Armados con los sensores de codificación génica, el nuestro y otros grupos de investigación criamos animales en los que los genes codificadores correspondientes se activaban sólo en grupos de neuronas concretos. Mediante este método se han analizado los organismos preferidos de los genetistas (lombrices, peces cebra, ratones y otros).

La mosca del vinagre se ha mostrado particularmente dispuesta a revelar sus secretos ante el asalto combinado de la óptica y la genética. Su cerebro es compacto y observable al microscopio, de modo que pueden apreciarse circuitos enteros en un solo campo visual. Además, es fácil modificar la genética de la mosca; en el transcurso de un siglo se han identificado gran parte de los interruptores genéticos necesarios para marcar grupos de neuronas determinados. De hecho, fue en la mosca donde Minna Ng, Robert D. Roorda y el autor, entonces en el Centro Sloan-Kettering del Cáncer de la ciudad de Nueva York, grabamos las primeras imágenes del flujo de información entre ciertos grupos de neuronas de un cerebro. Desde entonces hemos descubierto nuevos trazados de circuitos y nuevos principios operativos. En 2007, hallamos neuronas en el aparato olfativo de la mosca que parecen inyectar "ruido de fondo" al sistema. Sospechamos que esa señal amplifica las entradas débiles y, por tanto, incrementa la sensibilidad del animal a los olores, lo que favorece la búsqueda de comida.

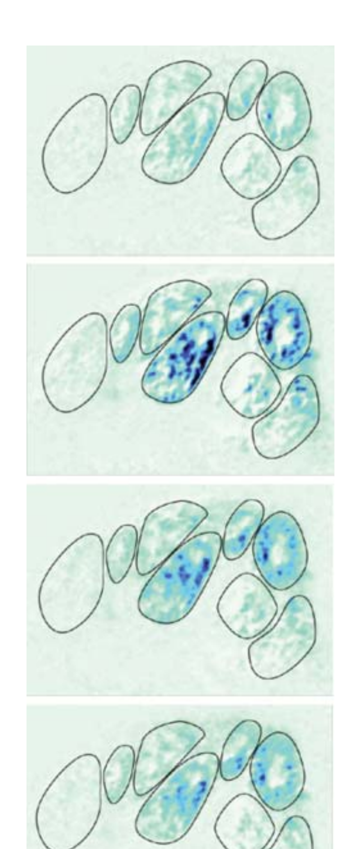
Los sensores se convirtieron en un instrumento poderoso para observar la comunicación interneuronal. A finales de los años noventa quedaba todavía un problema por resolver. La mayoría de los experimentos que exploran el funcionamiento del sistema nervioso son indirectos. Se provoca una respuesta del cerebro del animal al presentarle una imagen, un tono acústico o un aroma; luego, por medio de electrodos implantados en puntos posteriores del circuito, se determina el trayecto que sigue la señal resultante y se miden las señales eléctricas detectadas en esas posiciones. Por desgracia, las señales sensoriales sufren profundos cambios de formato en su avance, y así, conforme se alejan de ojos, oídos o nariz aumenta la dificultad para saber qué señales corresponden a las respuestas de tales órganos.

Por supuesto, el método en modo alguno es aplicable a los numerosos circuitos del cerebro que no se dedican a procesar información sensorial sino a funciones motrices, mentales o emocionales. No hay una manera directa de activar esos circuitos a partir de los sentidos.

De la observación al control

El problema perdería gravedad si pudieran estimularse directamente grupos definidos de neuronas, con independencia de los estímulos sensoriales. Nos preguntamos, pues, si sería posible desarrollar instrumentos que, amén de proporcionar sensores para observar la actividad neuronal, facilitaran la activación exclusiva de tipos escogidos de neuronas.

Abordaron ese asunto Boris V. Zemelmann, hoy en el Instituto Médico Howard Hughes, y el autor. Sabíamos que, si conseguíamos programar genéticamente en las neuronas un accionador controlado por luz (a modo de "gatillo"), superaríamos los obstáculos que impedían estudiar los circuitos neuronales por medio de electrodos. Puesto que en el probando pueden implantarse sólo un número limitado de electrodos a la vez, no es posible escuchar



2. ESCUCHAS OPTICAS. Mediante la adición a las neuronas de unos sensores moleculares que emiten luz cuando se excitan, podemos rastrear el procesamiento de la información conforme se produce en los circuitos neuronales. Esta secuencia de tramas de vídeo sigue la actividad de las neuronas olfatorias que inciden en zonas específicas del cerebro de una mosca (*círculos*). La excitación de las neuronas intensifica la fluorescencia (*azul*), que decae luego al aquietarse las células.

1997: Se desarrollan pigmentos de codificación genética que revelan la actividad neuronal.

2002: Desarrollo de los primeros accionadores de codificación genética, proteínas que al exponerse a la luz provocan actividad neuronal.

2005: Uso de la luz para controlar moscas a las que se ha incorporado un accionador.

1990 | 2000

JESPER SJÖSTRÖM Y MICHAEL HÄUSSER *Colegio Universitario de Londres (neuronas piramidales)*; GERO MIESENBÖCK; DE "VIDEO-RATE NONLINEAR MICROSCOPY OF NEURONAL MEMBRANE DYNAMICS WITH GENETICALLY ENCODED PROBES", POR ROBERT D. ROORDA, TOBIAS M. HOHL, RICARDO TOLEDO-CROW Y GERO MIESENBÖCK EN *JOURNAL OF NEUROPHYSIOLOGY*, VOL. 92; 3 DE MARZO DE 2004 (*vídeo sobre fluorescencia*)

o excitar más de un número también reducido de células en un momento dado. Añádase la dificultad de que los electrodos apuntan a tipos específicos de células y que deben mantenerse colocados, lo que complica los experimentos con animales que se mueven.

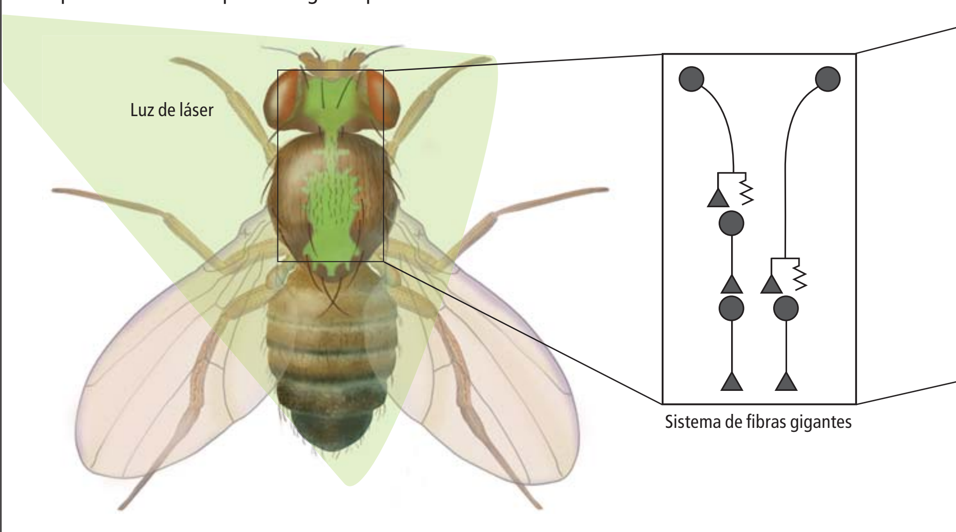
Si fuera posible utilizar un "interruptor genético" que nos ayudara a encontrar todas las neuronas de interés (las que producen dopamina, por ejemplo) y pudiéramos controlar mediante la luz (sin intervención directa) esas células, para estudiarlas no necesitaríamos conocer de antemano su ubicación en el cerebro. Y no importarían los cambios de posición por los movimientos del animal. Si la estimulación de las células provistas de accionadores provocara un cambio de conducta, sabríamos que esas células estaban operando en el circuito que regula tal conducta. Y si al propio tiempo consiguiéramos que esas mismas células incorporaran un gen sensor, las células activas se encenderían, revelando su posición en el sistema nervioso. Mediante la repetición del experimento en animales transgénicos, de modo que cada uno tuviera un accionador en un tipo distinto de célula, podríamos componer la secuencia de eventos que transcurren de la excitación neuronal a la conducta e identificar todas las partes implicadas en el circuito. Lo único que debíamos hacer era desarrollar un accionador codificable genéticamente con capacidad para convertir en impulso eléctrico un destello de luz.

Para descubrir un accionador de esa índole, lo razonable era examinar células que generaran señales eléctricas en respuesta a la luz, como los fotorreceptores del ojo humano. Esas células incorporan antenas que absorben luz, las rodopsinas; al recibir luz, ordenan la apertura o cierre de los canales iónicos de la membrana celular, alterando así el flujo de iones y produciendo señales eléctricas.

Decidimos trasplantar los genes que codifican esas rodopsinas (más algunos genes auxiliares requeridos para la función de la rodopsina) a neuronas cultivadas en una placa de Petri. Mediante ese sencillo montaje, ensayamos si la iluminación del plato provocaba una activación neuronal. Nuestro experimento tuvo éxito: a principios de 2002, cuatro años después del desarrollo de los primeros sensores genéticamente codificados con capacidad de revelar la actividad neuronal, se estrenaron los primeros accionadores de codificación genética.

MOSCA DE CONTROL REMOTO

Los experimentos en moscas del vinagre han demostrado que las proteínas fotosensibles podrían operar a modo de accionadores ("interruptores de encendido" controlados por el experimentador) en las neuronas de animales vivos. Las moscas se modificaron genéticamente para que sólo las neuronas del sistema de fibras gigantes sintetizaran las proteínas. La activación de estas neuronas provoca la respuesta de huida del insecto. En el experimento ilustrado, la exposición del sistema nervioso de la mosca a un destello de luz ultravioleta desencadenó la respuesta de huida, prueba de que el accionador operaba según lo previsto.



LILA RUBENSTEIN (*todos los dibujos*); DE "MUTATIONS IN *SHAKING-B* PREVENT ELECTRICAL SYNAPSE FORMATION IN THE *DROSOPHILA* GIANT FIBER SYSTEM", POR PAULINE PHELAN ET AL., EN *JOURNAL OF NEUROSCIENCE*, VOL. 16, N.° 3; 1 DE FEBRERO DE 1996 (*sistema de fibras gigantes teñido*)

Moscas de control remoto

En fecha reciente, se han incluido entre los accionadores otras proteínas fotosensibles como la melanopsina, presente en células retinianas especializadas que participan en la sincronización de los ritmos circadianos con la rotación terrestre. Y el trabajo conjunto de Georg Nagel, del Instituto Max Planck de Biofísica en Frankfurt, Karl Deisseroth, de la Universidad de Stanford, y Stefan Herlitze, de la Universidad Case Western Reserve, ha demostrado la idoneidad de otra proteína: la canalrodopsina-2, que orienta los movimientos de las algas en el agua. Existen, además, diversos accionadores de codificación genética que se controlan mediante unos compuestos químicos sintetizados por nosotros y por Isacoff y sus colaboradores de Berkeley, Richard H. Kramer y Dirk Trauner.

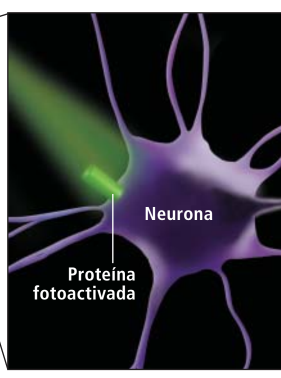
El siguiente paso fue demostrar que nuestro accionador podría operar en un animal vivo, reto que propuse a Susana Q. Lima, estudiante de nuestro grupo. Para confirmar tal hipótesis, nos centramos en un circuito de las moscas especialmente sencillo, constituido por unas pocas neuronas. Se trata del circuito que controla el reflejo de huida que hace al insecto estirar con rapidez las patas para levantarse y, una vez en el aire, desplegar las alas y volar. Inicia esa secuencia de acciones un impulso eléctrico emitido por dos de las 150.000 neuronas que tejen el cerebro de la mosca. Esas neuronas de mando activan un circuito subordinado: un generador de patrones que envía órdenes a los músculos que mueven patas y alas de la mosca.

Identificamos un interruptor genético que se hallaba siempre activado en las dos neuro-

1 Una mosca del vinagre con accionadores fotosensibles en las neuronas del sistema de fibras gigantes se expone al destello de un láser ultravioleta.



2 La luz incide en una proteína fotoactivada en la superficie de la neurona; el fenómeno provoca la apertura de los canales iónicos de la membrana celular. El flujo de iones resultante causa la excitación de las neuronas.





3 Activado el sistema de fibras gigantes, el insecto se lanza al aire y despliega las alas.



4 En un experimento subsiguiente, las moscas decapitadas respondieron de igual modo a la luz. Quedaba así excluida la posibilidad de que su reacción tuviera origen visual y se demostraba que el láser controlaba el sistema de fibras gigantes.

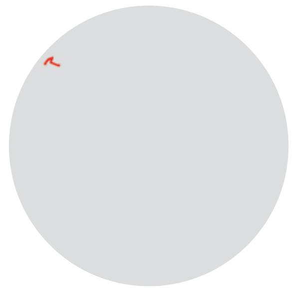
DE "REMOTE CONTROL OF BEHAVIOR THROUGH GENETICALLY TARGETED PHOTOSTIMULATION OF NEURONS", POR SUSANA Q. LIMA Y GERO MESENBÖCK EN *CELL*, VOL. 121, N.° 1; 2005, REIMPRESION AUTORIZADA POR ELSEVIER (*diagramas de actividad*)

nas de mando, pero no en las demás, y otro interruptor que se mostraba activado en las neuronas del generador de patrones, mas no en las neuronas de mando. Por medio de esos interruptores, preparamos sendos conjuntos de moscas en las que respectivamente fueran las neuronas de mando o las del generador de patrones las productoras de nuestro accionador fotosensible. Con gran satisfacción, vimos que ambos tipos de moscas remontaban el vuelo al recibir un destello de láser con intensidad suficiente para penetrar la cutícula del organismo y llegar al sistema nervioso. Ello confirmaba que en el reflejo de huida participaban las células de mando y las generadoras de patrones, y que los accionadores operaban según lo previsto. Dado que el accionador se hallaba codificado sólo en las neuronas pertinentes, éstas eran las únicas que "sabían" responder al estímulo óptico (no era preciso, por tanto, dirigir el láser a células concretas). Algo así como si radiáramos un mensaje a una ciudad de 150.000 habitantes, de los que sólo unos pocos tuvieran un receptor que decodificara la señal; para todos los demás, el mensaje resultaría inaudible.

Persistía, sin embargo, un enojoso dilema. Las neuronas de mando que inician el reflejo de huida reciben señales procedentes de los ojos, señales que activan el circuito de huida cuando se produce un "apagón", como sucede cuando la sombra de un depredador se cierne amenazante. (Todos lo hemos comprobado en alguna ocasión cuando hemos intentado atrapar una mosca: al acercar la mano, el insecto salta y se escapa.) Nos quedaba la duda de si el reflejo de huida obedecía, también en nuestro caso, a una reacción visual ante el pulso de láser y no a un control óptico directo de los circuitos de mando o de generación de patrones.

Para resolverlo, recurrimos a un sencillo, aunque brutal, experimento: cortar la cabeza a las moscas. Decapitados, esos insectos sobreviven uno o dos días y mantienen intactos los circuitos de generación de patrones en el interior de sus ganglios torácicos (un tosco equivalente de la médula espinal de un vertebrado). Al incidir luz en tales circuitos, saltaron al aire cuerpos de otro modo inertes. Si bien los vuelos fueron inestables y acabaron en espectaculares caídas o colisiones, su mera existencia demostraba que el láser controlaba el circuito generador de patrones; de ningún otro modo podían detectar luz y reaccionar a ella unos animales sin cabeza.

Por otro lado, preparamos moscas que incorporaran activadores fotosensibles sólo en las neuronas generadoras de dopamina. Expuestas a un destello de láser, esas moscas se tornaron repentinamente activas; recorrían sin cesar su habitáculo. Los estudios anteriores habían indicado que la dopamina favorecía, en los animales, la predicción de recompensas o castigos. Nuestros hallazgos lo han confirmado: los insectos incrementan su actividad y exploran de un modo diferente su entorno, como si vieran alterada su expectación de ganancia o pérdida.





3. LOS PATRONES DE ACTIVIDAD de moscas del vinagre cuyas neuronas dopaminérgicas se modificaron para ser fotosensibles cambiaron espectacularmente al exponer los insectos a la luz. Las moscas que apenas se movían (*arriba*) se pusieron a examinar su habitáculo (*abajo*). La observación refuerza la hipótesis de que la dopamina potencia la conducta exploradora.

Toros de control remoto

Tres días antes de la fecha en que debía publicarse en la revista *Cell* un informe sobre estos experimentos, volaba el autor hacia Los Angeles para dar una conferencia. Estaba leyendo un libro que me había regalado un amigo (*Soy Charlotte Simmons*, de Tom Wolfe), convencido de que me gustaría su descripción de los neurocientíficos. Tropecé entonces con un pasaje en el que la protagonista asistía a una conferencia sobre los trabajos de José Manuel Rodríguez Delgado, un científico español que controlaba a distancia el comportamiento de animales (no a través de accionadores de codificación genética fotosensibles, sino por señales de radio transmitidas a electrodos implantados en el cerebro). Rodríguez Delgado había arriesgado su vida para demostrar la eficacia de su planteamiento: paró un toro furioso en plena embestida. Ello marcaba, según el conferenciante de la novela, un cambio de dirección en la neurociencia. Significaba la decisiva

MOLECULAS ALUMBRADORAS

La optogenética se basa en las propiedades ópticas de ciertas proteínas. Una de las moléculas que más ha influido en el desarrollo de esta técnica ha sido la proteína verde fluorescente (PVF), pigmento responsable de la bioluminiscencia en la medusa *Aequorea victoria*. Las aplicaciones de este pigmento (protagonistas del premio Nobel de química de este año) nacieron cuando se descubrió que la transferencia a otros organismos del gen de la PVF producía la expresión de otra proteína que conservaba la fluorescencia. El hallazgo abrió las puertas al uso de la PVF a modo de biomarcador: se ha aplicado a la visualización no invasiva de la evolución de tumores, a la observación del crecimiento de bacterias patógenas y del desarrollo de circuitos neuronales, a la detección de contaminación por metales pesados, etcétera.

¿Cuál es el mecanismo que subyace bajo tan eficiente proceso de fluorescencia? Estructura y actividad se encuentran especialmente entrelazadas en el funcionamiento de la PVF. Al asomarnos a su interior, descubrimos una maquinaria fascinante y de suma complejidad.

Para que tenga lugar la fluorescencia, una estructura fotosensible (cromóforo) debe primero absorber radiación, normalmente en el espectro visible o en el ultravioleta cercano. Si esa energía absorbida se disipa rápidamente al medio, se produce una desactivación sin fluorescencia. Si, en cambio, la desactivación no se produce inmediatamente después de la absorción, el cromóforo se relaja posteriormente mediante la emisión de un fotón de frecuencia inferior a la absorbida. Este segundo fenómeno, que ocurre en la escala de tiempo de los picosegundos (un picosegundo equivale a 10^{-12} segundos), corresponde a la fluorescencia.

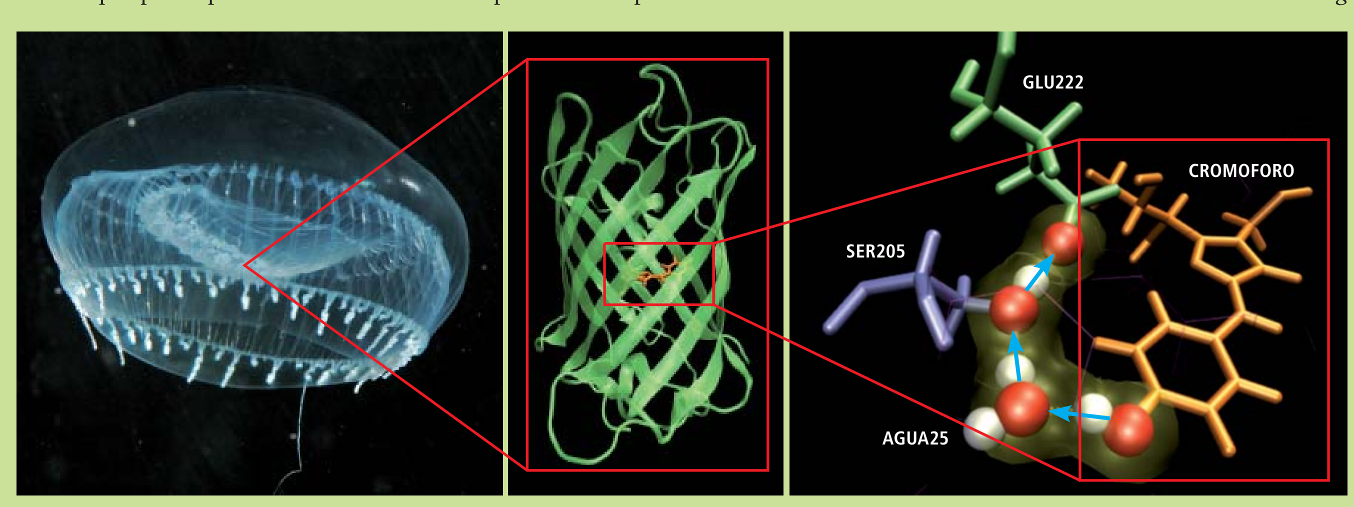
A mediados de los años noventa del siglo pasado, se llevaron a cabo mediciones de la fluorescencia de la PVF. Se utilizaron para ello técnicas de femtoquímica, las que emplean pulsos de láser del orden del femtosegundo (un femtosegundo equivale a 10^{-15} segundos). Se determinó el tiempo de aparición de fluorescencia con respecto al momento de la absorción de luz por parte del cromóforo de la proteína. Tras la medición en condiciones normales, se sustituyeron los átomos de hidrógeno de la proteína por su isótopo deuterio (de masa doble que la del hidrógeno), que ralentiza los procesos químicos en los que participa. Si el intervalo de tiempo hasta la aparición de la fluorescencia aumentaba, ello significaría que la fluorescencia aparecía después de una transferencia protónica (reacción en la que un ácido cede un núcleo de hidrógeno a una base, disminuyendo en una unidad la carga eléctrica de éste). Así fue.

Tales observaciones condujeron al modelo fotoquímico para la operación de la proteína fluorescente verde, que, sin demasiados cambios, es ampliamente aceptado hoy en día. El cromóforo, inicialmente con carga neutra y un grupo ácido, absorbe un fotón. La absorción de radiación aumenta la acidez del cromóforo. Ello provoca la liberación ultrarrápida de un protón, lo que deja al cromóforo dotado de carga negativa. El cromóforo con carga negativa es el responsable de la fluorescencia en la región verde del espectro.

La obtención de la estructura tridimensional de la proteína (conseguida casi en paralelo a los experimentos de femtoquímica descritos) reveló el modo en que el entorno del cromóforo desarrolla una función decisiva en el mecanismo de fluorescencia. El cromóforo se halla casi en el centro de una estructura en forma de barril que lo protege del medio exterior. Rodean al cromóforo varios residuos aminoacídicos con capacidad para recibir un protón (actuando a modo de base) y transferir otro inmediatamente (actuando a modo de ácido). Esos grupos forman una cadena que se activa cuando el cromóforo absorbe luz y libera un protón. El primer grupo que recibe ese protón cede a su vez un protón a un segundo grupo vecino, y así sucesivamente. La reacción en cadena produce un rápido alejamiento del protón transferido respecto del cromóforo con carga negativa; ello impide la recombinación inmediata de ambos y posibilita, por tanto, la fluorescencia verde.

El mecanismo luminiscente de la proteína verde fluorescente dista de hallarse resuelto. Faltan piezas del rompecabezas. Varios grupos de investigación están aplicando en la actualidad potentes métodos computacionales que simulan a escala atómica la dinámica de la molécula. Se proponen con ello ahondar en el funcionamiento de la PVF y sus variantes.

Oriol Vendrell Romagosa
Instituto de Química Física
Universidad de Heidelberg



SIERRA BLAKELY (*Aequorea victoria*); ORIOL VENDRELL (*moléculas*)

La medusa *Aequorea victoria* (*izquierda*) debe su bioluminiscencia a la proteína verde fluorescente (PVF). En la PVF, una estructura en forma de barril (*centro*) protege del medio externo al cromóforo (*derecha*). Cuando el cromóforo absorbe luz, se produce entre los grupos aminoacídicos que lo rodean una transferencia protónica en cadena (*flechas*), que posibilita la fluorescencia.

derrota del dualismo entre mente y cerebro: si las manipulaciones físicas del cerebro podían modificar la intención del animal, ambas entidades eran una sola y la misma.

José Manuel Rodríguez Delgado había sido profesor de fisiología en mi propia institución, Yale. En 1969 escribió *El control físico de la mente: hacia una sociedad psicocivilizada*. En dicha obra resumía sus trabajos sobre el control de los movimientos, la evocación de recuerdos e ilusiones y la obtención de placer o dolor [*véase* "Orígenes de los chips cerebrales", por John Horgan; MENTE Y CEREBRO, n.º 15]. La obra concluía con un debate sobre las repercusiones médicas, éticas, sociales e incluso bélicas de la capacidad de control de las funciones cerebrales.

Nuestro artículo atrajo cierta atención mediática. El *Drudge Report* (popular noticiero en la Red) destacó en los titulares la obtención de moscas a control remoto. Y el programa televisivo *Tonight Show* parodió posibles aplicaciones de la técnica.

Desde entonces, la fotoactivación se ha utilizado para controlar otras conductas. En octubre de 2007, Deisseroth y Luis de Lecea, de la Universidad de Stanford, anunciaron los resultados de un estudio sobre ratones en el que utilizaron fibra óptica para inyectar luz directamente a las neuronas productoras de hipocretina (neurotransmisor en forma de péptido) con el fin de averiguar si estas neuronas regulaban el sueño. Se sospechaba que la hipocretina desempeña esa función porque ciertas razas de perros carentes de receptores de hipocretina sufren ataques repentinos de somnolencia. La investigación reveló que la estimulación durante el sueño de las neuronas de hipocretina tendía a despertar a los ratones, lo cual apoyaba esa hipótesis.

J. Dylan Clyne, en nuestro laboratorio de Yale, utilizó accionadores de codificación genética para percibir mejor las diferencias sexuales de conducta. Los machos de numerosas especies animales dedican un tiempo considerable al cortejo del sexo opuesto. Mediante la vibración de un ala, los machos de las moscas del vinagre producen un "canto" que resulta irresistible para las hembras. Con miras a explorar el asiento neuronal de esta conducta masculina, Clyne activó mediante luz el generador de patrones responsable del canto. Descubrió que también las hembras poseen los circuitos generadores de tales sonidos, si bien en circunstancias normales carecen de las señales neuronales necesarias para la activación de los mismos. De esa observación se desprende que las conexiones internas del cerebro del macho y la hembra podrían ser, en gran parte, idénticas. Las diferencias en la conducta sexual provendrían de la acción de interruptores maestros en posiciones estratégicas que ajustan los circuitos en "modo macho" o "modo hembra".

Fototerapia

Hasta ahora se han obtenido, mediante ingeniería genética, animales que incorporan sensores o accionadores en las neuronas de interés. Pero podrían equiparse con ambos a la vez. A más largo plazo, esperamos poder criar especímenes dotados de múltiples sensores o accionadores que nos permitan estudiar, de forma simultánea, varias poblaciones neuronales en un mismo individuo.

Este dominio recién adquirido sobre los circuitos neuronales abre inmensas oportunidades

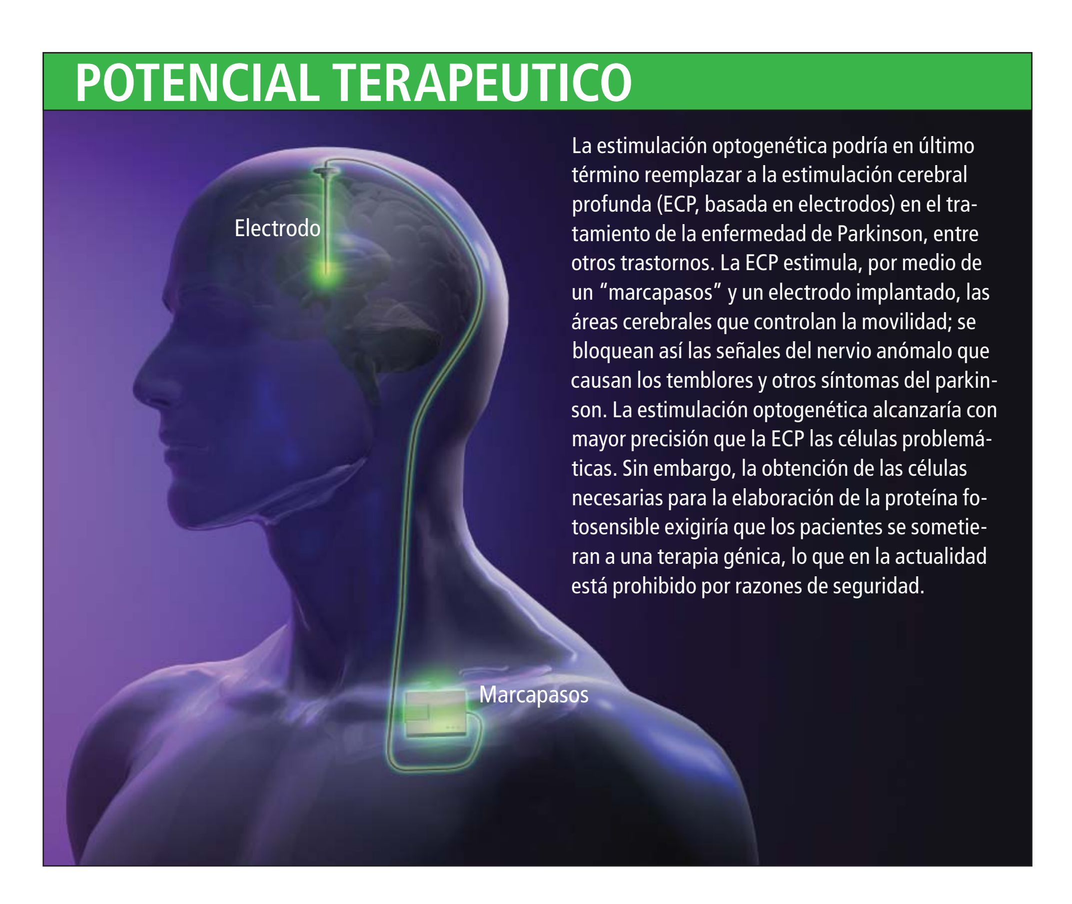
FUNCION NEURONAL

Estudios basados en la optogenética han permitido localizar y manipular circuitos neuronales que gobiernan varias conductas en moscas, lombrices, peces y ratones. La tabla muestra algunos de los resultados.

	ANIMAL	CONDUCTA ESTUDIADA	CONCLUSIONES
Experimentos de visualización	Mosca del vinagre	Memoria olfatoria	Las neuronas internas dorsales forman un circuito retroactivo para estabilizar los recuerdos olfatorios
Experimentos de visualización	Lombriz	Busca de comida	La supresión de alimentos causa en las neuronas AWC una actividad permanente, que altera la estrategia de búsqueda en la lombriz
Experimentos de visualización	Ratón	Reconocimiento de género	Unas células sensoras de feromonas, específicas del macho y de la hembra, codifican la capacidad de reconocer el género

	ANIMAL	CONDUCTA ESTUDIADA	CONCLUSIONES
Experimentos por control remoto	Mosca del vinagre	Evasión del estrés	El dióxido de carbono que emiten las moscas estresadas provoca una respuesta de evasión en otras moscas
Experimentos por control remoto	Pez cebra	Huida	El reflejo de huida al contacto se activa y desactiva mediante estímulos sensoriales
Experimentos por control remoto	Ratón	Toma de decisiones	La actividad eléctrica influye en las decisiones de orden perceptual en menos de 300 neuronas corticales

POTENCIAL TERAPEUTICO



La estimulación optogenética podría en último término reemplazar a la estimulación cerebral profunda (ECP, basada en electrodos) en el tratamiento de la enfermedad de Parkinson, entre otros trastornos. La ECP estimula, por medio de un "marcapasos" y un electrodo implantado, las áreas cerebrales que controlan la movilidad; se bloquean así las señales del nervio anómalo que causan los temblores y otros síntomas del parkinson. La estimulación optogenética alcanzaría con mayor precisión que la ECP las células problemáticas. Sin embargo, la obtención de las células necesarias para la elaboración de la proteína fotosensible exigiría que los pacientes se sometieran a una terapia génica, lo que en la actualidad está prohibido por razones de seguridad.

ALFRED T. KAMAJIAN

a la investigación básica. Pero, ¿qué decir de su utilidad práctica? ¿Se han puesto esperanzas desmesuradas? Rodríguez Delgado identificó diversos campos en los que el control directo de la actividad neuronal aportaría beneficios clínicos: prótesis sensoriales, tratamiento de los trastornos de movilidad (como ahora se consigue mediante estimulación cerebral profunda para la enfermedad de Parkinson) y regulación del humor y la conducta.

Percibió esas posibles aplicaciones como una prolongación directa y racional de la práctica clínica existente, no como una incursión alarmante en la dudosa ética del "control mental". De hecho, parecería arbitrario e hipócrita establecer una frontera definida entre los medios físicos para influir en la función cerebral y las manipulaciones químicas, ya sean en forma de psicofármacos o de alguno de los cócteles vigorizantes que ayudan a recuperarse de una dura jornada. De hecho, las intervenciones físicas pueden dirigirse y dosificarse con mayor precisión que los fármacos, con la consiguiente reducción de los efectos secundarios.

Se han iniciado ya estudios sobre la aplicación clínica de la optogenética. En 2006 se utilizaron canales iónicos fotoactivados para restablecer la fotosensibilidad en las neuronas retinianas de ratones con fotorreceptores degenerados. Vehiculado por un virus se introdujo en las células el gen codificador de la canalrodopsina-2; lo inyectaron directamente a los ojos del animal. Las retinas así parcheadas enviaron al cerebro señales evocadoras de luz, pero desconocemos si el procedimiento restituyó realmente la visión.

Pese a su atractivo teórico, las terapias optogenéticas en humanos se enfrentan en la práctica a un importante obstáculo: exigen introducir en el cerebro un gen extraño, el que codifica el fotoaccionador. La terapia génica no puede abordar todavía ese reto. La Agencia Federal de Fármacos y Alimentos estadounidense es consciente de los riesgos implicados y por ello ha prohibido por ahora ese tipo de intervenciones, salvo con fines experimentales rigurosamente controlados.

El control sobre los circuitos cerebrales (o incluso sobre otras células electrosensibles, como las que producen hormonas y las que crean músculo) ofrece una oportunidad inmediata: descubrir nuevas dianas farmacológicas. Si la manipulación experimental de los grupos de células X, Y, Z consigue que un animal coma, duerma o deseche sus temores, estas células X, Y, Z constituyen dianas potenciales de medicinas contra la obesidad, el insomnio y la ansiedad, respectivamente. La obtención de compuestos que regulen las neuronas X, Y, Z podría muy bien conducir a tratamientos nuevos o mejorados, así como a nuevas aplicaciones de los fármacos existentes. Queda mucho por descubrir, pero la optogenética presenta un futuro brillante.

Bibliografía complementaria

TRANSMISSION OF OLFACTORY INFORMATION BETWEEN THREE POPULATIONS OF NEURONS IN THE ANTENNAL LOBE OF THE FLY. Minna Ng, Robert D. Roorda, Susana Q. Lima, Boris V. Zemelman, Patrick Morcillo y Gero Miesenböck en *Neuron*, vol. 36, n.º 3, págs. 463-474; 2002.

REMOTE CONTROL OF BEHAVIOR THROUGH GENETICALLY TARGETED PHOTOSTIMULATION OF NEURONS. Susana Q. Lima y Gero Miesenböck en *Cell*, vol. 121, págs. 141-152; 2005.

NEURAL SUBSTRATES OF AWAKENING PROBED WITH OPTOGENETIC CONTROL OF HYPOCRETIN NEURONS. Antoine R. Adamantidis, Feng Zhang, Alexander M. Aravanis, Karl Deissseroth y Luis de Lecea en *Nature*, vol. 450, págs. 420-424; 2007.

SEX-SPECIFIC CONTROL AND TUNING OF THE PATTERN GENERATOR FOR COURTSHIP SONG IN *DROSOPHILA*. J. Dylan Clyne y Gero Miesenböck en *Cell*, vol. 133, n.º 2, págs. 354-363; 2008.

Genética de la

La detección en nuestros genes de factores que configuren la inteligencia está resultando más escurridiza de lo esperado

CARL ZIMMER

CONCEPTOS BASICOS

- Contamos ahora con nuevas técnicas para sondear el cerebro y el genoma, en busca de las bases genéticas de la inteligencia.
- Estos trabajos aportan una nueva visión de la inteligencia, al tiempo que revelan una complejidad imprevista en la interacción entre genes y entorno.
- Cuanto más ahondamos en la relación entre genes e inteligencia, más misteriosa resulta la función de aquéllos. Pero la empresa sigue mereciendo la pena.

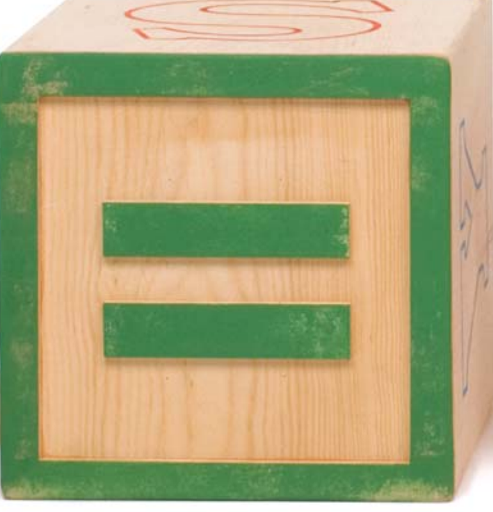
El trabajo de Robert Plomin requiere grandes dosis de paciencia. Este experto en genética de la conducta, adscrito al Instituto de Psiquiatría de Londres, se ha propuesto desentrañar la naturaleza de la inteligencia. En sus investigaciones observa el desarrollo y crecimiento de millares de niños. Les pregunta, por ejemplo, "¿Qué tienen en común el agua y la leche?" o "¿En qué dirección se pone el Sol?". Al principio, eran encuestados en persona o por teléfono. En la actualidad, muchos de esos niños son preadolescentes; las pruebas se realizan a través de Internet.

La prueba ha arrojado resultados esperanzadores. Todos los niños encuestados son gemelos. Las puntuaciones de gemelos idénticos (univitelinos) muestran menor discrepancia que las de gemelos no idénticos (mellizos) y éstas, a su vez, difieren menos que las de los niños sin parentesco. Sumados a otros resultados similares, procedentes de diversos estudios, nos indican que los genes poseen una influencia notoria sobre la puntuación de los niños en los tests de inteligencia.

Pero Plomin busca un conocimiento más hondo. Se propone determinar los genes responsables de tal influencia. Y cuenta ahora con un instrumento de localización de genes que no podía ni haber soñado cuando empezó a trabajar con niños. Plomin y sus colaboradores han venido escrutando los genes de los probandos mediante una micromatriz, un chip diminuto con capacidad para identificar medio millón de fragmentos de ADN distintivos. La conjunción de este poderoso instrumento y de una amplia población infantil en la que efectuar el estudio debería facilitar el hallazgo de genes que influyeran en las calificaciones obtenidas en las pruebas, por pequeño que fuese su efecto.

Sin embargo, los resultados del estudio con micromatrices (la más extensa redada de genes







inteligencia

vinculados a la inteligencia llevada a cabo hasta entonces) resultaron abrumadoramente desalentadores. El grupo de Plomin halló sólo seis marcadores genéticos con indicios de ejercer influencia sobre las calificaciones. Y cuando sometieron los datos a análisis estadísticos rigurosos, para descartar fluctuaciones aleatorias, se quedaron con sólo uno, que daría cuenta de un 0,4 por ciento de las variaciones en puntuación. La guinda del pastel es que se desconoce la función que desempeña en nuestro organismo ese gen.

La experiencia de Plomin es característica de los estudios científicos sobre la inteligencia. Además de micromatrices, se aplican escáneres cerebrales y otras técnicas punteras en un intento de documentar algunos de los intrincados pasos de danza que los genes y el entorno trazan de forma conjunta en el desarrollo de la inteligencia. Se ha empezado a revelar el modo en que las diferencias en inteligencia se reflejan en la estructura y la función cerebrales. Algunos científicos han comenzado incluso a elaborar una nueva visión de la inteligencia, que entienden como un reflejo de las formas en que fluye por el cerebro la información. Pese a tales avances, la inteligencia sigue constituyendo, no obstante, un profundo misterio.

CARY WOLINSKY

Medición de la inteligencia

En cierto sentido, la inteligencia es algo sencillo. "Algo que todo el mundo observa en otros", comenta Eric Turkheimer, de la Universidad de



Virginia. “Todo el mundo sabe que unas personas son más listas que otras, sin entrar en lo que eso signifique en términos técnicos. Es algo que percibimos en una persona en cuanto hablamos con ella.”

Pero esa idea intuitiva no se presta a una traducción científica directa. En 1996, la Asociación estadounidense de Psicología emitió un informe sobre la inteligencia, donde expresaba que los individuos divergen en su capacidad para comprender ideas complejas, adaptarse al medio, aprender de la experiencia, adoptar diversas formas de razonamiento y superar obstáculos apelando al pensamiento y a la reflexión.

Para medir las diferencias mencionadas, los psicólogos inventaron, a comienzos del siglo xx, baterías de pruebas en razón del tipo de pensamiento: razonamiento matemático, razonamiento espacial y destreza verbal, entre otros. Para comparar las puntuaciones obtenidas en pruebas distintas, se desarrollaron escalas normalizadas de inteligencia. La más conocida es el cociente intelectual (CI), que se determina asignando el valor 100 a la puntuación promedio.

Los valores de CI no son arbitrarios. Permiten formular pronósticos robustos sobre otros rasgos de la vida de la persona. Conocidos los CI de la infancia resulta posible efectuar predicciones sobre el futuro escolar o profesional. Las personas con un CI elevado tienden a ser más longevas que el promedio.

El CI de un individuo en modo alguno permite saber *todo* lo referente a los puntos fuertes y a las flaquezas cognitivas de una persona, advierte Richard J. Haier, de la Universidad de California en Irvine. Pero sí puede decirnos mucho sobre ella. Ocurre lo mismo con la temperatura y la tensión arterial: si bien esas dos cifras no resumen todo cuanto concierne a nuestra salud, contienen información esencial para el médico de cabecera.

¿Qué mide entonces el CI? La teoría más en boga sobre el cociente tiene más de un siglo de antigüedad. En 1904, el psicólogo Charles Spearman observó que los sujetos que obtenían buenos resultados en las pruebas de un tipo propendían a obtenerlos también en pruebas de otra clase. La correlación entre unas y otras puntuaciones no era muy fuerte, pero Spearman la juzgó suficiente para considerar que era consecuencia de lo que él llamaba “factor g”, una abreviatura de “coeficiente de inteligencia general”.

Pero Spearman desconocía el modo en que surgía en el cerebro la inteligencia general. En los últimos decenios, se ha buscado una respuesta a partir de las regularidades que se observan en las puntuaciones obtenidas en los tests por grandes grupos. Dos serían las posibles fuentes de esas variaciones: el medio (que incluye desde la educación que recibe una persona hasta las enfermedades que haya sufrido durante su desarrollo) y los genes. Los genes pueden configurar el cerebro de suerte tal que los individuos puedan responder mejor o peor a las preguntas de los tests de inteligencia.

Desde los años sesenta del siglo pasado, se han venido obteniendo, a través del estudio de gemelos, pruebas sobre las funciones respectivas de genes y entorno. Para comprender la importancia de los gemelos en el estudio de la inteligencia, imaginemos que un par de gemelos idénticos sean adoptados desde su nacimiento por familias distintas. Los genes de ambos niños son los mismos, no así el ambiente. Si los aspectos genéticos no repercutieran en las puntuaciones de los tests, esperaríamos que en éstas no se apreciase mayor semejanza de la que se observa en personas sin ningún parentesco. En cambio, si los genes desempeñasen una función crítica en la inteligencia, los gemelos idénticos deberían obtener puntuaciones similares.

Dos personas con el mismo genoma presentan idéntica correlación que una persona consigo misma, un año después. Los resultados correspondientes a gemelos idénticos criados por separado apenas difieren de los correspondientes a gemelos idénticos que se han criado juntos. Pero estas semejanzas requieren tiempo para aflorar. A los 16 años, el CI de los niños adoptados por separado se parece

El autor

Carl Zimmer es autor de varios libros, entre ellos *Soul Made Flesh* (2005), una historia de la investigación sobre el cerebro. Su bitácora, *The Loom* (El telar), ha merecido uno de los premios para webs sobre ciencia y técnica que otorga *Scientific American*.



ROBERT PLOMIN estudia gemelos en busca de rasgos heredados. Sostiene que la inteligencia que miden los tests está determinada, en parte, por genes.

NEIL HARVEY (*Plomin y gemelas*)

Medición de la inteligencia

El primero de los tests de inteligencia de uso generalizado fue ideado por Alfred Binet, psicólogo francés, en 1905. Se proponía pronosticar el progreso escolar de los niños y, en particular, la detección de los que podrían necesitar ayuda especial. Desde entonces se han aplicado tests orientados hacia facultades cognitivas específicas (razonamiento matemático, verbal o espacial) con la intención de diagnosticar deficiencias mentales y de definir el espectro de la inteligencia normal. Existe una correlación positiva entre las puntuaciones obtenidas en las pruebas habituales de capacidades cognitivas múltiples (test de Stanford-Binet y escala Wechsler) y las calificaciones escolares. Pero esas pruebas pronostican sólo alrededor del 25 por ciento de la variación en el rendimiento escolar; el 75 por ciento restante queda sin explicar [*véase* “Medición de la inteligencia”, por Robert J. Sternberg; en Inteligencia viva, TEMAS INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, n.º 17]. Las puntuaciones de los diversos componentes de los tests de inteligencia tienden, a su vez, a mostrar correlación entre sí, lo que sugiere que los tests sí calibran cierto grado general de capacidad mental.
El coeficiente de inteligencia general (*g*) no se evalúa mediante un test propio, sino que se extrae por métodos estadísticos a partir de las puntuaciones obtenidas en otros tests de inteligencia. Esas puntuaciones de capacidades específicas guardarían semejanza con las medidas que tomaría un sastre de brazos, piernas y torso; *g* vendría a ser la talla de la prenda resultante: pequeña, mediana o grande.

al CI de sus padres biológicos en la misma proporción que los chicos criados por sus padres biológicos.

Ante esos resultados, Plomin se persuadió de que los genes desempeñaban una función crucial en la inteligencia, aunque, obviamente, no operaban en solitario. Así empezó su búsqueda de genes.

Territorio no cartografiado

Hace unos quince años, cuando Plomin partió en busca de genes, lo hizo casi en solitario. No podía explorar sin más el genoma humano, porque todavía no había sido descodificado. Pero sí se habían identificado varios genes, algunas de cuyas mutaciones se hallaban asociadas al retraso mental. Plomin razonó que otras variantes de tales genes podrían ocasionar sutiles diferencias en la inteligencia. Con sus colaboradores comparó niños que destacaban por la bondad o deficiencia de sus resultados en los tests, en busca de alelos de los 100 genes que aparecían con una frecuencia anormalmente elevada en uno u otro de los grupos. No encontraron nada.

Plomin amplió entonces su búsqueda. No se limitó a examinar un conjunto predeterminado de genes; balizó millares de marcadores genéticos que se encontraban repartidos en los cromosomas de sus probandos. Si un marcador aparecía con una frecuencia insólita en estudiantes con resultados excepcionales (por excelentes o por deficientes), tal vez hubiera cerca un gen vinculado a la inteligencia. Enrolaron a más niños en el estudio, para facilitar la detección de genes con efectos menos acusados. En cierto punto de la investigación, Plomin creyó haber descubierto un vínculo genuino entre la inteligencia y el gen *IGF2R*, que codifica un receptor, activo en el cerebro, del factor de crecimiento. Pero cuando él y otros trataron de reproducir el resultado, fracasaron.

Plomin sospechaba que, para hallar genes de inteligencia, sería necesaria una cantidad mayor de marcadores genéticos. En el desarrollo de óvulos y espermatozoides, los cromosomas intercambian segmentos de ADN. Cuanto más cercanos se encuentran dos segmentos de ADN, mayor es la probabilidad de que se transfieran al alimón. Pero en los primeros estudios de Plomin, cada par de marcadores se hallaba separado por millones de nucleótidos. Era posible, pues, que los genes de inteligencia se encontrasen tan distantes de un marcador genético, que en unas ocasiones fuesen transferidos juntos, pero en otras Para reducir la probabilidad de que aconteciera, debía aumentar la densidad de la “población” de marcadores genéticos.

No fue pequeña la alegría de Plomin cuando pudo disponer de micromatrices con capacidad para detectar 500.000 marcadores (centenares de veces más que los que había utilizado hasta entonces). Se obtuvieron frotis de los carrillos de 7000 niños, se aisló su ADN y se procedió a su examen mediante las micromatrices. Los resultados fueron, una vez más, decepcionantes. Hallaron numerosos falsos positivos; y los efectos eran tan débiles, que no podían darse por buenos si antes no lograban reproducirse en investigaciones reiteradas.

El fracaso de esa búsqueda de genes de la inteligencia ha resultado para Plomin sumamente instructivo. Los estudios sobre gemelos siguen alentando su convicción sobre la existencia de tales genes. En su opinión, una variabilidad en el ADN es la responsable de las variaciones en la inteligencia. Pero cada una de las variaciones genéticas detectadas hasta ahora aporta sólo una contribución insignificante a las diferencias en inteligencia. Plomin estima que los efectos más acusados alcanzarían a explicar menos del 1 por ciento de esas diferencias.

Debe haber, pues, centenares —miles, tal vez— de genes que producen de forma conjunta el espectro completo de variación en la inteligencia de base genética. Plomin no cree que existan genes especializados en destreza verbal y que otros lo sean para la comprensión espacial. En los estudios con gemelos se aprecia una tendencia a obtener puntuaciones similares en los tests correspondientes a todas esas clases de inteligencia. Si los genes

CARY WOLINSKY

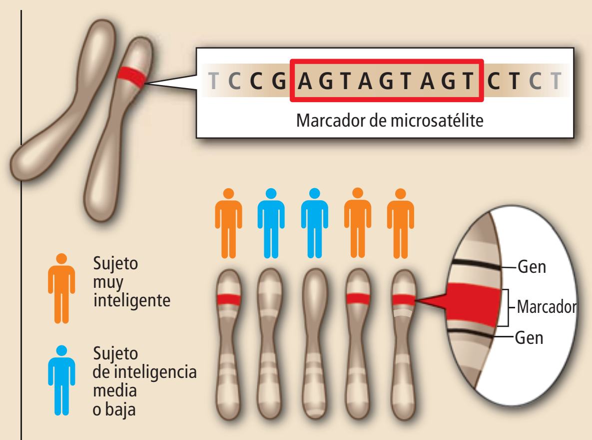
pertenecieran a conjuntos especializados, una persona heredaría aptitudes de una clase y no de las otras.

Plomin barrunta asimismo que sus resultados ofrecen ciertos indicios sobre la forma en que los genes influyen en la "estructura cerebral" de la inteligencia. Argumenta que en el caso de que existan muchos genes con efectos minúsculos, será muy improbable que todos se concentren en una sola zona del cerebro. Lo más probable es que influyan sobre una red extensa de regiones cerebrales. Asimismo, cada uno de esos genes asociados a la inteligencia puede producir muchos efectos distintos en diferentes partes del cerebro.

La demostración de la hipótesis de Plomin deberá esperar a la obtención de una lista de genes con un efecto indiscutible sobre el funcionamiento cerebral y asociados a las puntuaciones de los tests de inteligencia. Tal vez se tarde mucho en confeccionar la lista, pero Plomin se siente alentado por nuevos resultados procedentes de una línea de investigación inédita: una cascada de estudios de neuroimaginología, que se proponen detectar las sedes cerebrales de la inteligencia.

A LA CAZA DE GENES

Se han utilizado diversos métodos, cada vez más perfectos, para buscar genes que contribuyan a la inteligencia. Esta se considera un rasgo cuantitativo, una propiedad que presentan en mayor o menor grado todos los probandos. La comparación del ADN de personas de inteligencia elevada, entre ellas y con el de personas de inteligencia mediana o escasa revela regularidades compartidas por los sujetos más inteligentes. Esos indicadores, a su vez, balizarían la ubicación de los genes que influyen en el nivel de inteligencia. Empero, tales experimentos no han descubierto todavía ningún "gen de la inteligencia".



LOCI DE RASGOS CUANTITATIVOS (LRC)
Para hallar una región cromosómica (locus) implicada en un rasgo cuantitativo, se empieza por buscar secuencias repetidas en el ADN, los microsatélites marcadores, que se hallan intercalados a lo largo de los cromosomas. Si en los probandos más inteligentes aparecieran con mayor frecuencia unos marcadores determinados, se examinaría el ADN adyacente para identificar genes vecinos.

La forma de la inteligencia

Philip Shaw, del norteamericano Instituto Nacional de Salud Mental (NIMH), y sus colaboradores han venido analizado escáneres cerebrales de escolares. Una vez al año, extrajeron imágenes de cerebros en desarrollo. Shaw ha centrado su atención en el crecimiento de la corteza cerebral, en la que acontecen los procesamientos de información más complejos. Antes de cumplir los veinticinco años, la corteza va cambiando de forma y estructura. Shaw ha observado que se reflejan en el desarrollo cerebral diferencias en las puntuaciones de los tests de inteligencia.

La corteza del cerebro infantil adquiere grosor a medida que se desarrollan nuevas neuronas y se establecen nuevas ramificaciones. Después, al ser podadas muchas ramificaciones, la corteza adelgaza. Pero Shaw observó que, en ciertas partes de la corteza, el desarrollo seguía caminos distintos en niños con diferente grado de inteligencia. Los niños de inteligencia superior contaban inicialmente con cortezas muy delgadas, que más adelante adquirieron grosor; pero en la adolescencia adelgazaron de nuevo y rápidamente.

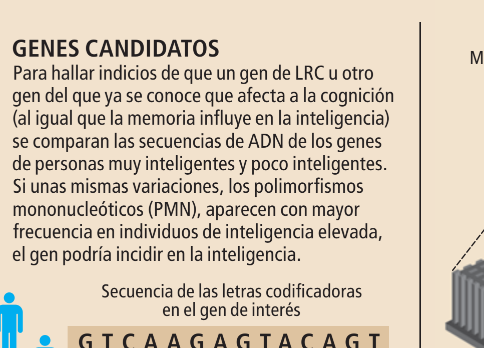
El estudio del cerebro adulto ha arrojado un patrón semejante. Las personas que alcanzan puntuaciones elevadas en los tests de inteligencia tienden a poseer ciertas regiones corticales de mayor tamaño que el promedio. Shaw confía en que algunos de esos patrones sean consecuencia del ambiente. Pero esas regiones corticales propenden a ser de igual tamaño en los gemelos, lo que parece indicar que los genes son responsables, asimismo, de una parte de las diferencias.



CARY WOLINSKY (*cubo*)

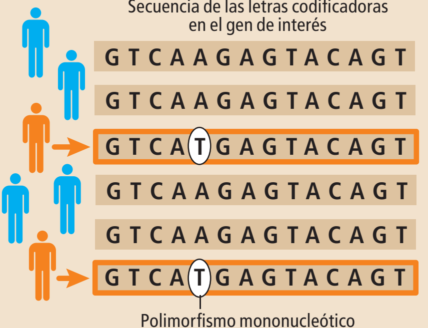
En estos últimos años se han publicado varios estudios que afirman que las personas con puntuaciones elevadas en los tests de inteligencia presentan patrones característicos de funcionamiento cerebral. Haier y Rex Eugene Jung, de la Universidad de Nuevo México, analizaron 37 estudios en los que se examinaba la actividad o el tamaño de regiones cerebrales, en busca de un patrón global. Haier y Jung no hallaron en el cerebro ningún "centro de inteligencia". Sí detectaron, en cambio, cierto número de regiones notables, repartidas por la corteza. En otros estudios, cada una de esas regiones se ha relacionado con un tipo de cognición determinada. En la opinión de Haier, parece que la inteligencia se construye sobre esos procesos cognitivos fundamentales, como la atención y la memoria, y quizá también sobre la facultad del lenguaje.

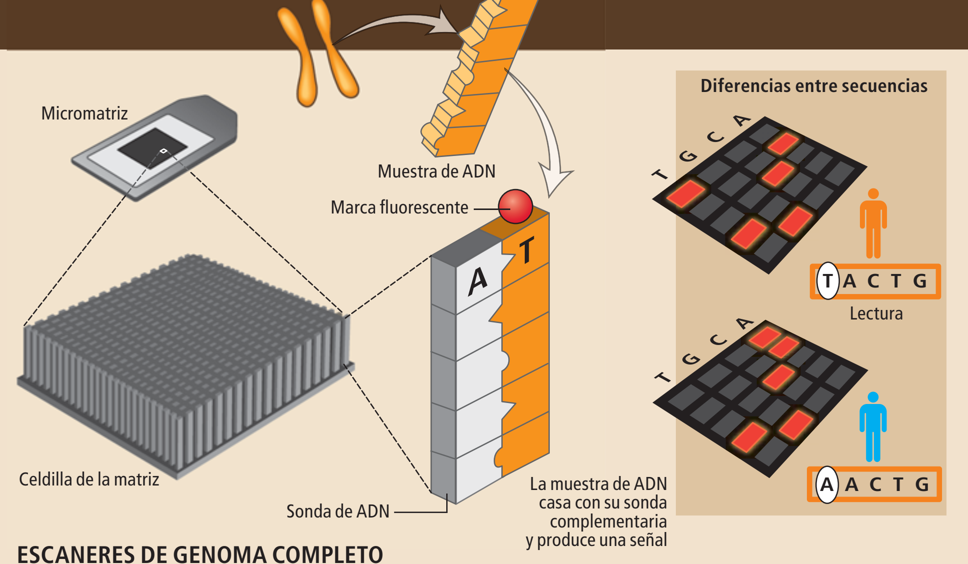
Además de describir el tejido de materia gris que compone la corteza, los trabajos encuentran la firma de la inteligencia en la materia blanca, que pone en conexión partes distantes de la corteza. Las personas muy inteligentes tienden a contar con tractos de materia blanca más organizados que el promedio. La materia blanca viene a ser como el cableado cerebral. Si asumimos que la inteligencia requiere potencia y velocidad de procesamiento, la materia blanca sería la encargada de proporcionar la velocidad; la materia gris aportaría la potencia.



GENES CANDIDATOS

Para hallar indicios de que un gen de LRC u otro gen del que ya se conoce que afecta a la cognición (al igual que la memoria influye en la inteligencia) se comparan las secuencias de ADN de los genes de personas muy inteligentes y poco inteligentes. Si unas mismas variaciones, los polimorfismos mononucleóticos (PMN), aparecen con mayor frecuencia en individuos de inteligencia elevada, el gen podría incidir en la inteligencia.





ESCANERES DE GENOMA COMPLETO

Para identificar nuevos genes candidatos, se utilizan micromatrices que nos permitan indagar por todo el genoma humano en busca de PMN. Cada célula de la matriz contiene pequeños filamentos de ADN diseñados para encajarse con una secuencia determinada de nucleótidos de un gen o de una región reguladora de genes. Cuando se lixivian a través de la micromatriz muestras de ADN, las coincidencias provocan la fluorescencia de la celdilla (rojo). Las diferencias de nucleótidos reveladas en las secuencias de ADN de sujetos muy inteligentes y en otros apuntan a un gen, y a un determinado alelo del mismo, que puede contribuir a la inteligencia.

JEN CHRISTIANSEN (*genes*)

Haier sugiere que esas secciones de la "red de inteligencia" pueden funcionar de modo diferente en personas distintas. Se puede pensar que una gran inteligencia dispone de una velocidad acelerada y notable potencia de procesamiento; pero también podría ser que tuviera mucho de una y menos de la otra. Todas las combinaciones pueden producir un mismo resultado final; cabría la coexistencia de dos personas con la misma inteligencia y cuyo cerebro llegue a tal comportamiento —no importa cómo lo midamos— por vías distintas.

Haier reconoce que se mueve en el terreno de la especulación. Se muestra convencido de que las técnicas de formación de imágenes han aportado una comprensión más honda de la inteligencia. Según él, es posible pronosticar el CI a partir de la cantidad de materia gris existente en un cierto número restringido de regiones cerebrales. Sospecha que, en un futuro no lejano, diez minutos en un escáner de resonancia magnética podrán revelar sobre los estudiantes de bachillerato lo mismo que un SAT ("Scholastic Aptitude Test", examen de aptitud estudiantil, algo así como nuestras PAU) de cuatro horas de duración.

Pero no todos los psicólogos se hallan dispuestos a tanto. Los más reacios no consideran que deba dotarse al CI o al factor *g* de una significación más profunda de la que merecen. Para empezar, la vida mental consiste en mucho más que hacer girar cubos con el pensamiento o en completar analogías. En la opinión de Turkheimer, la inteligencia humana es polifacética y de suma complejidad. Desafortunadamente, añade, los trabajos sobre otras facetas de la inteligencia son escasos. Podemos hallar numerosas aplicaciones al coeficiente de inteligencia general, pero ello no implica que la inteligencia humana constituya un ente unitario llamado *g* que se halle, en sentido literal, materializado en el cerebro. La latitud y la longitud constituyen datos útiles para la navegación, pero no declaran que las líneas geográficas estén grabadas sobre el planeta.

Wendy Johnson, de la Universidad de Minnesota, defiende que el factor *g* sí se corresponde con algún fenómeno cerebral, pero, al igual que Haier, no cree que se trate de un descriptor universal, válido para todo el mundo. Según esta psicóloga, aunque el concepto de inteligencia general no es vacuo, lo que constituye la inteligencia general de una persona no tiene por qué coincidir con la inteligencia general de otra. Nuestro cerebro posee la plasticidad suficiente para que en él ensamblemos, cada uno de nosotros, un tipo distinto de inteligencia general.

La determinación de la función que desempeñan los genes en los diferentes aspectos de la inteligencia entraña, sin duda, una gran dificultad. Además, resulta enteramente posible que en una lista de genes vinculados a la inteligencia figuren muchos que, en realidad, carecen de función cerebral específica. Turkheimer sugiere el siguiente experimento mental: imaginemos un gen que esté relacionado con la anchura del canal de parto. Las mujeres portadoras de un alelo que tienda a que tal canal

GLOSARIO

GWAS. "Genome-wide association study" (Estudio de asociación de genoma completo): Metodología fundada en un barrido rápido, en el genoma entero de miles de personas, de decenas o centenares de marcadores. Se utiliza en la búsqueda de variaciones asociadas con un rasgo concreto.

Potencia estadística: Cuanto mayor es el universo de probandos de un GWAS, mayor es la probabilidad de detectar variaciones con efectos reducidos, aunque significativos, sobre el rasgo estudiado.

Tamaño del efecto: El análisis estadístico determina qué porcentaje de las diferencias individuales en un cierto rasgo es atribuible a una determinada variante de ADN.



sea estrecho tendrán mayores dificultades para alumbrar y sus hijos correrán un mayor riesgo de sufrir en el parto cierto grado de anoxia. Por esta causa, su progenie podría presentar, en promedio, un CI ligeramente inferior al de los hijos de mujeres que poseen una versión distinta del gen. Algunos de esos niños serían portadores del gen del canal estrecho.

Aunque esos niños posean un gen que muestra correlación con CI bajos, ¿hemos de concluir que se trata de un gen de la inteligencia? No. Es un gen asociado al canal de parto. Las formas en que los genes podrían mostrar correlación con el CI varían tanto, que desentrañarlas resulta una tarea casi imposible.

Las propias investigaciones de Turkheimer ilustran otro aspecto de la compleja relación que existe entre genes e inteligencia: los genes no actúan con independencia del ambiente. Un mismo gen produce efectos distintos en ambientes diferentes. Turkheimer llegó a esa conclusión cuando se percató de que en los estudios sobre inteligencia de gemelos, efectuados con muestras grandes, figuraban pocos niños de familias pobres (la gente pobre suele carecer de tiempo, recursos o interés para participar en estudios no remunerados).

Turkheimer descubrió otras bases de datos que sí contenían mayor proporción de niños pobres. Analizó las puntuaciones obtenidas en los tests por centenares de mellizos, teniendo en cuenta su situación socioeconómica (que incluye factores como la renta familiar y el nivel de estudios de los padres). Observó que el vigor del efecto genético dependía de la situación socioeconómica. En los niños pertenecientes a familias ricas, alrededor del 60 por ciento de la variación en el CI respondía a causas genéticas. En el caso de las familias indigentes, en cambio, la influencia de los genes era prácticamente nula.

Turkheimer y sus colaboradores publicaron esos resultados en 2003. En mayo de 2007, observaron la misma pauta en otra base de datos. En lugar de comparar cocientes intelectuales, analizaron los resultados de 839 pares de gemelos en el NMSQT (“National Merit Scholarship Qualifying Test”, una prueba de valoración escolar) de 1962. Una vez más, se demostró que la influencia de los genes en la variación de los resultados académicos era escasa entre los niños de familias pobres y notable en las económicamente solventes. Turkheimer postula que la pobreza conlleva poderosas fuerzas ambientales que conforman la inteligencia ya en el seno materno, en la escuela y en lo sucesivo. Pero cuando los niños crecen en la relativa estabilidad de un hogar con desahogo económico, las diferencias de origen genético emergen.

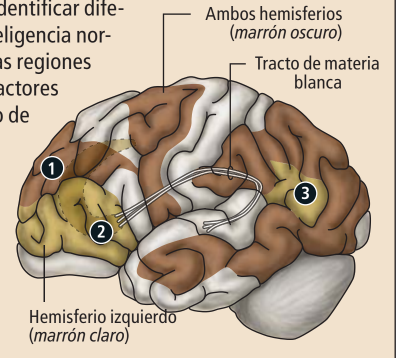
Por si no bastara semejante complejidad, se está observando que los genes alteran el efecto que el ambiente ejerce sobre nuestra inteligencia. Un grupo de científicos británicos descubrió en 2007 una asociación entre la lactancia natural y la mejora del CI, aunque sólo cuando los niños eran portadores de cierto alelo de un gen concreto. Los portadores de otra variante del gen, aunque fuesen amamantados por su madre, no obtenían puntuaciones diferentes de los niños alimentados con leche artificial.

Los genes pueden influir también en la conducta, de modo que influyen en el desarrollo de la inteligencia. Según Johnson, las personas crean su propio ambiente. Si un niño muestra interés por las matemáticas o el dibujo, es más probable que le regalen un libro de mates o lápices de colores. De ese modo practicará más y diferirá del niño que no tiene el libro o los lápices. Los padres responden en función de lo que hace el niño. Sin embargo, los modelos de estudio no miden bien esa realimentación.

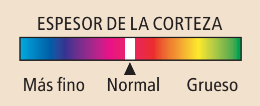
Este efecto podría explicar una de las regularidades más desconcertantes que aparecen en los estudios sobre inteligencia realizados

ESCANERES CEREBRALES

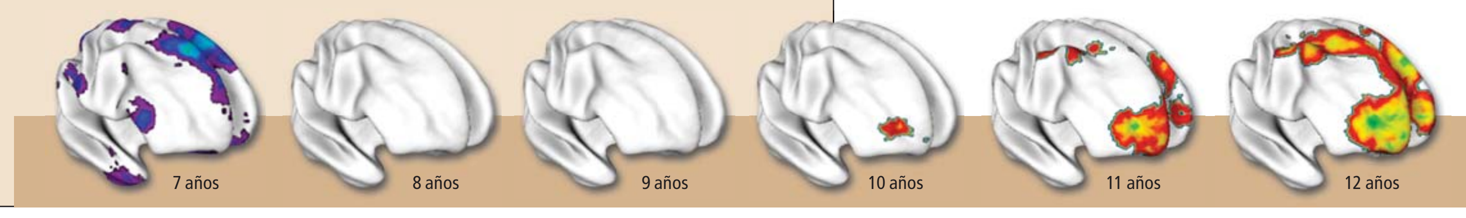
Las técnicas de formación de imágenes han permitido identificar diferencias entre individuos muy inteligentes y otros de inteligencia normal, que conciernen al tamaño y a la actividad de ciertas regiones cerebrales. Los estudios parecen indicar que entre los factores de la inteligencia se cuenta la eficiencia del intercambio de información entre tales áreas.



LAS REGIONES CEREBRALES que, a juzgar por los escáneres, parecen hallarse vinculadas a la inteligencia son responsables de diversos procesos: el razonamiento lógico (*1*), el lenguaje (*2*) y la integración sensorial (*3*). Además, los tractos de materia blanca que conectan las regiones cerebrales presentan una estructuración mayor en los individuos más inteligentes, de lo que se infiere que la transmisión de información podría tal vez desempeñar una función clave en la inteligencia.



EL DESARROLLO CEREBRAL presenta en su evolución temporal una serie de pautas vinculadas a la inteligencia. En los niños de CI elevado, ciertas áreas de la corteza cerebral son más delgadas que el promedio en los primeros años, pero después, en la adolescencia, adquieren mayor grosor. Se desconoce todavía el efecto de esas diferencias sobre el procesamiento de la información.



JEN CHRISTIANSEN; FUENTE: REX EUGENE JUNG *Universidad de Nuevo México* Y RICHARD J. HAIER *Universidad de California en Irvine*

RETORNO A LOS FUNDAMENTOS

La mayor exploración del genoma humano efectuada hasta la fecha examinó a 7000 probandos y 500.000 polimorfismos mononucleóticos (PMN). Sin embargo, los resultados mostraron sólo seis PMN supuestamente implicados en la inteligencia, cada uno con minúsculos efectos sobre la diferencia entre individuos. Tres de los PMN se encontraban en regiones de ADN intergénico; los demás se encontraban en intrones (porciones de genes que no codifican proteínas). Es posible que todos tuvieran efectos reguladores sobre la actividad génica, pero la función de las proteínas codificadas por los tres genes conocidos nos invita a sospechar que los PMN no influyen, de una forma obvia, sobre la cognición; antes bien, conducirían a sutiles variaciones en el desarrollo cerebral básico y en el rendimiento celular.

PMN	UBICACION EN EL GENOMA	FUNCION DEL ADN CIRCUNDANTE	EFECTO
1	*Entre genes*	Desconocido	0,2%
2	*Entre genes*	Desconocido	0,2%
3	*Entre genes*	Desconocido	0,1%
4	En el gen *DNAJC13*	Codifica una chaperona (proteína) encargada de numerosas funciones celulares	0,4%
5	En el gen *TBC1D7*	La proteína que codifica activa una enzima que participa en la síntesis proteínica, el mantenimiento celular básico y el procesamiento sensorial	0,1%
6	En el gen *FADS3*	Codifica una proteína que interviene en la síntesis de ácidos grasos y en el control de su concentración en la membrana celular	0,2%

con gemelos: ¿por qué la influencia de los genes sobre las puntuaciones de los tests se deja sentir más con el tiempo? La respuesta se hallaría en la capacidad de los genes para influir en el moldeado de nuestro ambiente intelectual. La búsqueda de nuevas experiencias, la lectura de libros o el gusto por la conversación son factores que pueden modificar el cerebro. Conforme el niño va tomando las riendas de su vida, el efecto podría ser más acusado.

La inteligencia corresponde a una propiedad cerebral emergente. La idea de que nacemos con quince genes (por dar un guarismo) que graban de forma indeleble cuánta inteligencia vamos a poseer y el modo en que se va a desarrollar nuestro cerebro es errónea.

¿Por qué estudiar la inteligencia?

La inteligencia entraña una complejidad enorme. Y la ciencia apenas ha logrado avanzar en su comprensión, pese al esfuerzo empeñado. No obstante, muchos expertos en inteligencia siguen viendo en esta empresa aspectos prácticos, que justifican el esfuerzo. Haier, por ejemplo, confía en que una comprensión de la inteligencia, en cuanto fenómeno cerebral, ayudará a los profesores a diseñar recursos didácticos más eficaces. Mejorar la educación de las personas constituye uno de los mayores retos del siglo XXI.

Plomin sugiere que la comprensión del perfil génico de los individuos tal vez facilite el hallazgo de métodos óptimos para alentar y promover el aprendizaje. Si, como él vaticina, los estudios con micromatrices acaban por revelar los genes de la inteligencia, quizá resulte factible efectuar pruebas en los niños para averiguar de qué alelos son portadores. Ello permitiría confeccionar un índice de riesgo genético. Se detectarían rasgos genéticos indicativos de riesgo de dislalia o dislexia, con la esperanza de pronosticar e intervenir a tiempo mediante programas preventivos.

Algunos psicólogos se conforman con que la inteligencia constituya una parte fascinante de la naturaleza humana. En la opinión de Turkheimer, la inteligencia y los índices que la miden resultan ser, en muchos sentidos, los mejores predictores de toda la psicología. Por eso resultan tan fascinantes. Las calificaciones obtenidas en el SAT se hallan lejos de ser un predictor exacto de cómo vamos a desenvolvernos en otros asuntos, pero su capacidad pronóstica supera de lejos el mero conocimiento de nuestra personalidad. La inteligencia funciona. He aquí una cualidad psicológica palpable que nos permite efectuar pronósticos sobre las personas. Su propio carácter escurridizo, evidenciado cuando tratamos de aferrarla de forma numérica y concreta, constituye un problema científico apasionante.

13 años 14 años 15 años 16 años

PHILIP SHAW *Psiquiatría infantil, Instituto Nacional de Salud Mental (escáneres cerebrales)*

Bibliografía complementaria

GENETICA Y COGNICION. Robert Plomin y John C. DeFries en *Investigación y Ciencia*, julio de 1998.

EL FACTOR DE INTELIGENCIA GENERAL. Linda S. Gottfredson en *Temas Investigación y Ciencia*, n.º 17, págs. 20-26; 1999.

INTELLECTUAL ABILITY AND CORTICAL DEVELOPMENT IN CHILDREN AND ADOLESCENTS. Philip Shaw et al., en *Nature*, vol. 440, págs. 676-679; 30 de marzo, 2006.

THE PARIETO-FRONTAL INTEGRATION THEORY (P-FIT) OF INTELLIGENCE: CONVERGING NEUROIMAGING EVIDENCE. Rex E. Jung y Richard J. Haier en *Behavioral and Brain Science*, vol. 30, págs. 135-154; abril, 2007.

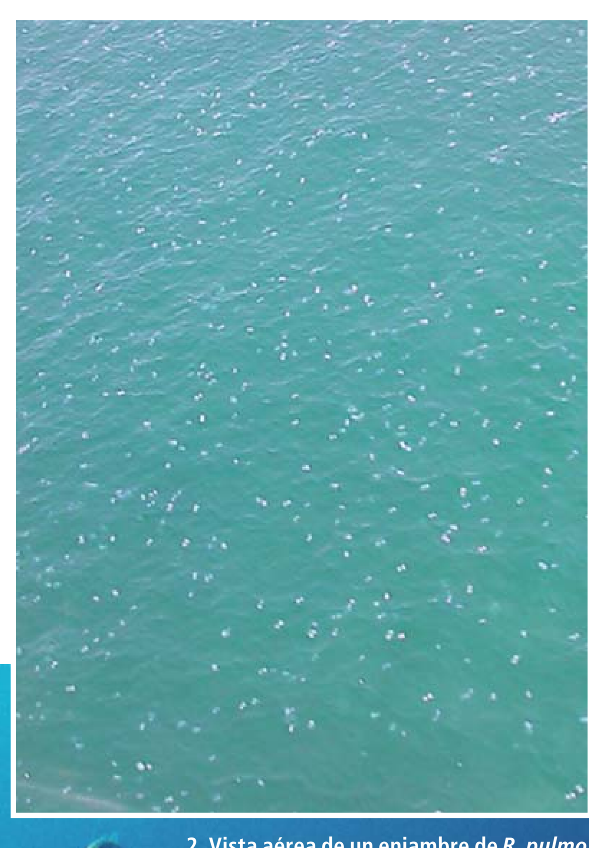
GENOMEWIDE QUANTITATIVE TRAIT LOCUS ASSOCIATION SCAN OF GENERAL COGNITIVE ABILITY USING POOLED DNA AND 500K SINGLE NUCLEOTIDE POLYMORPHISM MICROMATRICES. Lee M Butcher et al., en *Genes, Brain and Behavior*, vol. 7, n.º 4, págs. 435-446; 22 de enero, 2008.

La metamorfosis de una medusa

Uxue Tilves, Verónica Fuentes y Dacha Atienza

El ciclo biológico de muchas especies de grandes medusas (escifomedusas) consta de dos formas: el pólipo, que vive fijado al sustrato, y la medusa, de vida libre. Se trata de un fenómeno habitual en los cnidarios, filum al que pertenecen las medusas, pero muy raro en otros grupos de organismos planctónicos, en los que la fase larvaria vive libre en la columna de agua.

Hallamos un ejemplo espectacular de esta metamorfosis en la aguamala o acalefo azul (*Rhyzostoma pulmo*), una de las medusas más abundantes en la cuenca occidental del Mediterráneo. Los adultos aparecen en grupos, o enjambres, en verano, cuando la temperatura del agua es más elevada; a finales de la estación, empiezan a reproducirse. La fecundación es externa; a partir del huevo fecundado se produce una larva ciliada, o plánula, que se fija en el sustrato para desarrollar el pólipo. Durante el invierno, el pólipo vive fijado en el sustrato, preferiblemente rocoso; se dedica sólo a alimentarse. Al llegar de nuevo los meses estivales, con el aumento de la temperatura del agua, el pólipo produce, por estrobilación, las larvas de medusa (éfiras). En el curso de ese período, la éfira se alimenta, sobre todo de zooplancton, y crece hasta llegar al estado de adulto, completándose así el ciclo biológico.



ALEJANDRO OLARIAGA (*R. pulmo*); AGENCIA CATALANA DEL AGUA (*vista aérea*)

2. Vista aérea de un enjambre de *R. pulmo*.

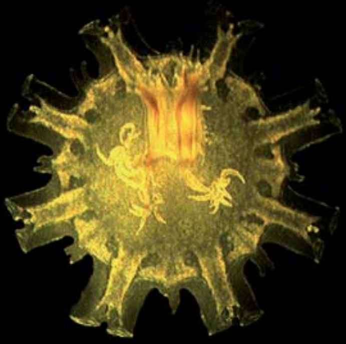
1. Medusa adulta (*Rhyzostoma pulmo*) en edad reproductiva.

3. Los adultos de *R. pulmo* comienzan a reproducirse a finales de verano. Los pólipos que se desarrollan a partir de los huevos fecundados pasan el invierno fijados al sustrato. Cuando vuelve el período estival, los pólipos producen, por estrobilación, las larvas (éfiras). A finales de verano, éstas se habrán transformado en medusas adultas. Se cierra el ciclo. (Las imágenes de este fotomontaje no están todas a la misma escala.)

MEDUSA ADULTA (3 meses)

MEDUSA JOVEN (1 mes)

EFIRA (1 semana)



POLIPO



ALEJANDRO OLARIAGA (*pólipo y éfira*), GEORGIOS TSOUNIS (*medusas*)

Martin Nowak: las matemáticas del origen de la vida

¿Cómo llegaron a dominar la primitiva Tierra unas moléculas que se reproducían? Con las matemáticas de la dinámica evolutiva, Martin A. Nowak intenta explicar el paso de la materia inerte a la vida

Heather Wax

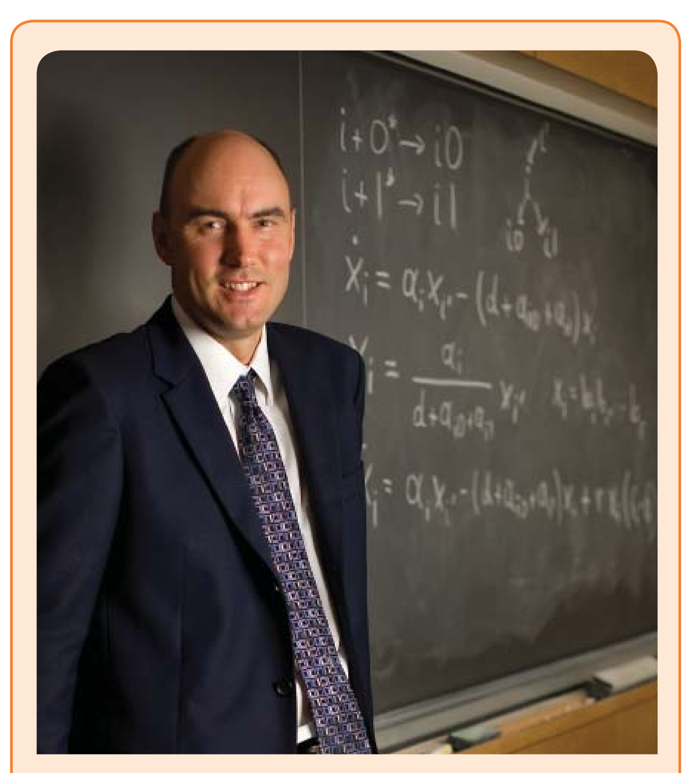
Allá por marzo, Martin Nowak causó un revuelo en la prensa con su estudio sobre la utilidad del castigo. Este matemático y biólogo de la Universidad de Harvard había reunido a 100 estudiantes para que se premiasen o castigasen unos a otros con monedas de céntimos en un juego de ordenador. Suele creerse que el castigo severo promueve la cooperación entre iguales, pero Nowak y sus colaboradores demostraron que no era así. Vieron que el castigo con frecuencia desencadena una espiral de represalias y se vuelve perjudicial y destructivo. Lejos de ganar, los que castigan tienden a intensificar el conflicto, van de mal en peor y se arruinan. "Los chicos buenos acaban ganando", saludaban los titulares.

No era la primera vez que las matemáticas y las simulaciones informáticas de Nowak provocaban un giro en los planteamientos de un problema complejo. En 2002 formuló unas ecuaciones que predicen la manera en que un cáncer evoluciona y se extiende (cuándo aparecen las mutaciones en una metástasis o cuándo se vuelven inestables los cromosomas). A principios de los noventa, su modelo de propagación de enfermedades había demostrado que el VIH daba lugar al sida sólo cuando el virus se reproducía tan deprisa, que la diversidad de cepas alcanzaba un nivel crítico, que desbordaba al sistema inmunitario. Los inmunólogos descubrieron después que había acertado con el mecanismo correcto [*véase* "Así destruye el sida las defensas inmunitarias", por Martin A. Nowak y Andrew J. McMichael; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1995]. Ahora Nowak vuelve a la carga. Esta vez modeliza el origen de la vida. En particular, está intentando encontrar "la transición de lo inerte a la vida", dice.

Nowak tiene ahora 43 años. Es austriaco. Estudió bioquímica. Cree que las matemáticas son "el verdadero lenguaje de la ciencia" y la clave para desvelar los secretos del pasado. Comenzó a indagar en las matemáticas de la evolución mientras preparaba su doctorado en la Universidad de Viena, con su compatriota Karl Sigmund, experto en teoría de juegos evolutiva. La dinámica evolutiva, como Nowak denominó a la disciplina, consiste en elaborar fórmulas que describan los componentes elementales del proceso evolutivo: la selección, la mutación, la deriva genética estocástica y la estructura de las poblaciones. Estas fórmulas remedan lo que sucede cuando individuos con diversas características se reproducen a diferente ritmo o cuando un mutante origina una estirpe que se hace con la población entera.

Nowak se esfuerza en estilizar la aparición de la vida mediante el sistema químico más simple que pueda describirse matemáticamente. Utiliza ceros y unos para representar los compuestos químicos elementales de la vida (adenina, timina, guanina, citosina o uracilo). Los llama monómeros. En su sistema se agregan, al azar, espontáneamente, para formar ristras de información binaria.

Nowak está investigando la cinética química de ese sistema, la manera en que crecen hebras con diferentes secuencias. Los principios fundamentales de este boceto valdrán, dice, para cualquier sistema químico consistente en un ensamblaje de monómeros entre sí, "tal y



ERIK JACOBS *Jacobs Photographic*

MARTIN A. NOWAK

UN BUEN FICHAJE: Le llamaron a la Universidad de Harvard en 2003, año en que le concedieron la primera plaza conjunta de los departamentos de matemáticas y biología.

CUESTION DE NUMEROS: acuñó la expresión "dinámica evolutiva", la modelización matemática del cambio con el paso del tiempo de las poblaciones de genes, organismos y otros entes biológicos.

EN UN PRINCIPIO: Utiliza ecuaciones dinámicas para elucidar si la fuerza evolutiva de la selección precedió a la reproducción, lo que podría explicar la aparición de los polímeros de la vida.

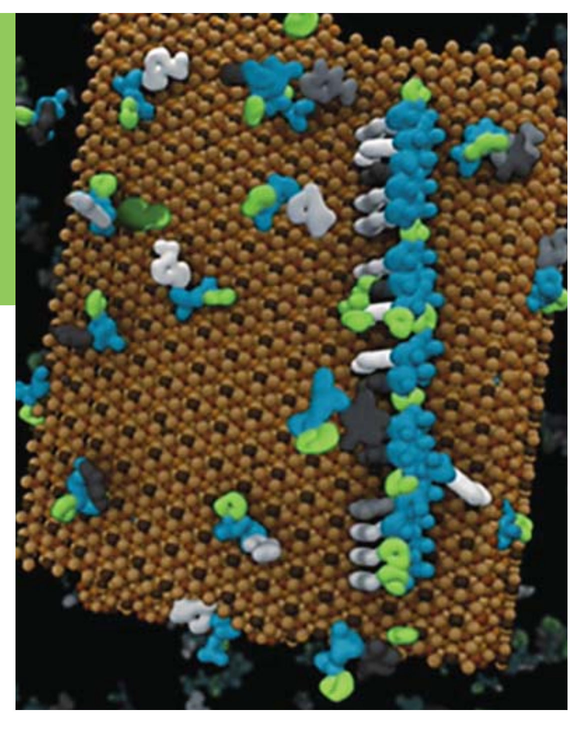
como las ecuaciones de Newton describen el movimiento de los planetas alrededor del Sol con independencia del material de que estén hechos". "La matemática", explica, "nos ayuda a ver cuál es el experimento crucial. Describe un sistema químico que se puede construir y que, una vez construido, dejaría ver el origen de la evolución".

¿Es posible que sea así de sencillo? Por el momento, el sistema tan sólo existe en el papel y en el ordenador. Aunque es fácil de modelizar matemáticamente, realizarlo en el laboratorio cuesta, pues arranca sin ninguna enzima ni plantilla que ayude a los monómeros a ensamblarse. "Resulta difícil imaginar una manera sencilla de elaborar ácidos nucleicos", dice David W. Deamer, de la Universidad de California en Santa Cruz. "Claro que tuvo que haber un material con el que empezase todo, pero sólo hay confusión, carecemos de ideas claras sobre cómo recrearlo en el laboratorio o ponerlo en marcha con la química y la física, sin recurrir a enzimas."

En los años ochenta, Leslie E. Orgel y su grupo, del Instituto Salk de Estudios Biológicos en San Diego, demostraron que una hebra de ARN podía servir de patrón para producir otra hebra de ARN complementario, fenómeno denominado polimerización no enzimática dirigida por plantilla. Pero elucidar cómo se podrían ensamblar por sí solos los nucleótidos, sin plantillas, ha resultado más dificultoso. "Busco un proceso que componga polímeros", declara Nowak.

Según Irene Chen, experta de Harvard en el origen de las células, una de las maneras en que los monómeros de ARN o de ADN podrían dar lugar a polímeros en ausencia de enzimas consistiría en añadir cierta sustancia, el imidazol, al extremo de los monómeros, que así se vuelven más reactivos, con lo que su polimerización es más rápida y sencilla. Los lípidos o la arcilla podrían resultar también esenciales (otros investigadores han demostrado que pueden acelerar la reacción). En el Instituto Politécnico Rensselaer, por ejemplo, James P. Ferris estimuló nucleótidos de adenina para que se ensamblaran hasta formar polímeros cortos de ARN (hebras de 40–50 nucleótidos de longitud) en una especie de arcilla mineral que quizá fuese corriente en el mundo prebiótico.

EN EL MUNDO PREBIOTICO, las superficies de arcilla (*marrón*) quizás ayudasen a que los nucleótidos (*azul* y *blanco*) compusieran hebras de ARN.



JANET IWASA Szostak Group, Hospital General de Massachusetts/Universidad de Harvard

Con su modelo matemático, Nowak examina reacciones químicas que conducen a este tipo de hebras, y les asigna velocidades: supone que las hebras con distinta información binaria crecen a un ritmo diferente (unas incorporan monómeros más deprisa que otras). Luego calcula sus distribuciones. Ha advertido que pequeñas diferencias en los ritmos de crecimiento resultan en pequeñas diferencias en su abundancia: las secuencias que crecen más despacio son menos frecuentes en la población; las más rápidas las desplazan. "Esto me parece fantástico", exclama Nowak, "porque así se da, de manera completamente natural, una selección previa a la reproducción".

Algunas hebras mutan. A veces, una secuencia acelera las tasas de reacción de otras secuencias, conforme a la clase de cooperación que Nowak considera desde hace mucho uno de los principios fundamentales de la evolución. En conjunto, el resultado es un sistema químico similar a la vida, rebosante de dinámica evolutiva. Denomina a este sistema "previda" porque "tiene las cualidades de la vida —diversidad genética, selección y mutación—, pero sin la reproducción".

Suele admitirse que la mutación y la selección son consecuencias de la replicación. Si de repente, por poner un caso, los pinzones de las Galápagos sólo encontraran semillas grandes y duras, los dotados de picos más grandes y fuertes tendrían más posibilidades de sobrevivir: generación tras generación, tal característica se tornaría más común en la población. La selección de un rasgo, sea el tamaño del pico o cualquier otro, depende de que se transmitan los genes de ese atributo a la progenie. Pero Nowak sostiene que su modelo muestra que puede haber selección previa a la reproducción, lo que significa que quizá la selección apuntó *hacia* la reproducción. De ser posible tal forma de selección, señala, se podría quizás explicar con ella el origen de la vida.

Basta con que unas pocas hebras desarrollen de súbito la capacidad de realizar copias de sí mismas; así, creen algunos, ciertas hebras de ARN alcanzaron la hegemonía en la Tierra primitiva. Eso sí, tuvo que haber un suministro de monómeros libres suficiente para que la replicación supusiera una ventaja, indica Nowak. Y las hebras reproductoras tuvieron que poder hacerse con los monómeros más deprisa que las que no se reproducían. Según sus cálculos, sólo cuando la tasa de replicación supera cierto umbral se da un cambio en el equilibrio del sistema y resulta posible que la vida emerja. "La vida destruye la previda. Todo ocurrió en cierto estadio."

Espera que su modelo inspire la realización de experimentos. Cuando se trata de comprender el comienzo de la evolución, construir el sistema químico que él describe matemáticamente (un sistema con sólo dos tipos de monómeros que se ensamblan por sí solos y luego se reproducen) es "lo más simple que se puede hacer", dice. "La matemática es el lenguaje adecuado para la evolución. Ignoro en qué podría consistir una 'teoría final' de la biología, pero hay algo que está claro: de lo que se trata es de encontrar las ecuaciones correctas."



EL CODIGO DE BARRAS DE LA VIDA

Las etiquetas de ADN, inspiradas en los códigos de barras comerciales, proporcionarían un medio rápido y barato para la identificación de especies

MARK Y. STOECKLE Y PAUL D. N. HEBERT

Hace varios años, mientras recorríamos los pasillos de un supermercado, uno de los autores (Hebert) quedó maravillado por el modo en que el almacén llevaba la cuenta de la mercancía: mediante el simple examen de la disposición de las líneas gruesas y delgadas que conforman el código de barras del producto. ¿Por qué no explotar de una forma similar el orden único que adoptan los cuatro ácidos nucleicos en una cadena corta de ADN, para identificar la multitud de especies que pueblan el planeta?

Desde que hace 250 años Carlos Linneo comenzó a clasificar de forma sistemática a los organismos, los biólogos se han fijado en distintas características (color, forma, pautas de comportamiento) para identificar animales y plantas. En los últimos decenios, se ha comenzado a utilizar a modo de instrumento de clasificación la información genética del ADN. Sin embargo, ambos métodos, clásicos y modernos (genéticos), exigen una extraordinaria pericia y consumen una enorme cantidad de tiempo. El uso de un tramo pequeño de ADN,

en cambio, que guardaría semejanza con el código de barras de doce dígitos de los productos, requeriría menos tiempo y destreza.

Nos propusimos, pues, hallar un segmento de ADN, presente en todas las especies, que distinguiera una especie animal de otra. Confiamos que, en un futuro no muy lejano, un lector de código de barras portátil, similar a un GPS, "leerá" dicho segmento en muestras mínimas de tejido. Un inspector en un puerto concurrido, un excursionista en la montaña o un científico en un laboratorio insertaría en el aparato una muestra que contuviera ADN (un bigote de gato o una pata de insecto) y detectaría la secuencia nucleotídica del fragmento "código de barras". Esa información se transmitiría al instante a una base de datos, una biblioteca de códigos de barras genéticos, que respondería con el nombre del espécimen, la fotografía y la descripción. Cualquier persona en cualquier lugar podría identificar una especie o saber si un organismo pertenece a una especie que no ha sido identificada todavía.



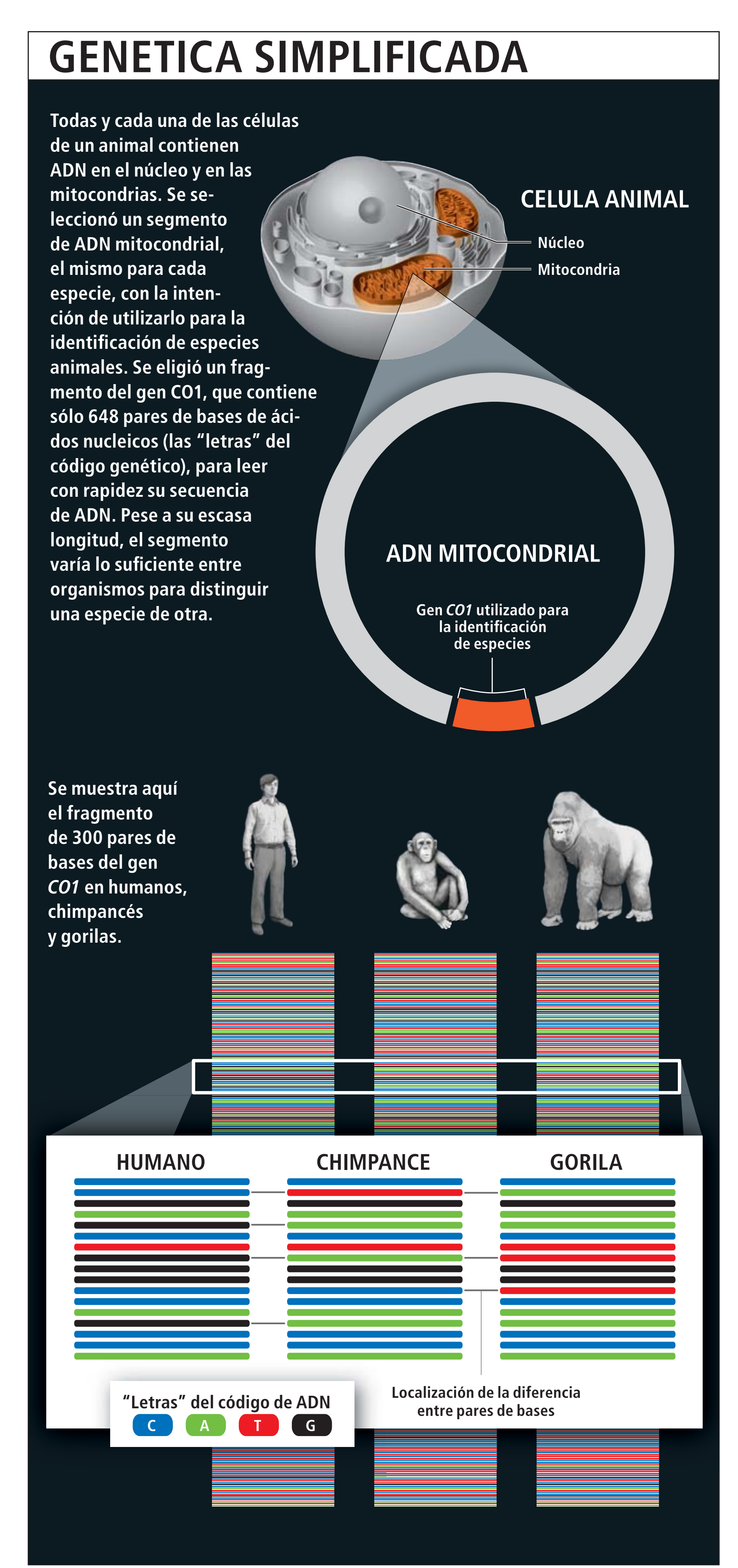
La necesidad de un código de barras genético

La morfología (la forma y la estructura de plantas y animales) ha permitido designar unos 1,7 millones de especies, una hazaña extraordinaria; sigue siendo la base de la diagnosis taxonómica de tipo linneana. Sin embargo, contar sólo con la morfología para describir la diversidad de la vida tiene sus límites. Los matices que distinguen especies muy afines entrañan tal complejidad, que los taxonomistas suelen especializarse en grupos de organismos estrechamente emparentados. De ahí que se requiera un gran número de expertos en taxonomía para identificar especímenes a partir de una revisión de la biodiversidad. Encontrar los expertos adecuados y distribuir los especímenes puede resultar lento y caro. Y aunque las bases de datos en la red, con imágenes de alta resolución, ofrecen cierta ayuda, persisten otros obstáculos.

Se estima que habrá unos ocho millones de especies por describir. Y conforme se expande la enciclopedia de caracterización morfológica,

CONCEPTOS BASICOS

- Los métodos tradicionales de clasificación de plantas y animales requieren destreza y tiempo. El examen de una porción pequeña de ADN resulta más rápido y fácil.
- Presentamos un nuevo método, la codificación en barras del ADN, inspirado en el código de barras mercantil.
- Un fragmento de ADN mitocondrial permite distinguir entre especies animales. Quizá llegará un día en que un lector portátil (similar a un GPS) se conectará a una base de datos con los códigos de barras genéticos de todas las especies. Mediante la inserción, en el lector, de una muestra de tejido, cualquier persona obtendrá una identificación instantánea de un animal o una planta.



la determinación de coincidencias entre un espécimen y las especies conocidas va a resultar cada vez más difícil. Además, los huevos y las formas juveniles, a menudo más abundantes que los adultos, puede que no tengan características distintivas y deban criarse hasta alcanzar la madurez —si ello es posible— para identificarlos. En ciertas especies, puede identificarse sólo un sexo. En las plantas, puede clasificarse un espécimen a partir de las flores, pero las raíces y otras partes del vegetal resultan indistinguibles. Un método normalizado, fácil y rápido, basado en la información genética, desataría esa gavilla de problemas.

Conseguir que funcione

Para averiguar si nuestra propuesta era razonable, lo primero que debíamos hacer era encontrar un fragmento de ADN corto e identificativo, es decir, un fragmento que contuviera la información suficiente para distinguir especies y fuera lo bastante corto para una utilización rápida y eficiente. Tras algunos ensayos, determinamos un segmento de un gen que serviría de referencia estándar para las especies animales. (Las plantas son otra historia, *véase el recuadro* "El reto singular de las plantas".)

El fragmento forma parte de un gen que se aloja en las mitocondrias, los orgánulos celulares productores de energía, que se heredan de la madre. Se trata del gen que da lugar a la subunidad I de la enzima citocromo c oxidasa (CO1). El fragmento escogido es tan corto, que su secuencia de pares de bases del ácido nucleico (los "peldaños" de la famosa doble hélice) se descifra mediante una sola lectura, con la técnica actual. Aun así, permite detectar una variación suficiente para distinguir la mayoría de las especies.

En los primates, cada célula contiene unos 3500 millones de pares de bases. Si bien el fragmento "código de barras" de la CO1 mide una longitud de sólo 648 pares de bases, los ejemplos tomados de humanos, chimpancés y otros grandes simios encierran diferencias suficientes para distinguir a los grupos. Los humanos variamos de uno a otro en uno o dos pares de bases del fragmento identificador, pero divergimos de nuestros parientes más cercanos, los chimpancés, en unos 60 sitios, y de los gorilas en unos 70.

El ADN mitocondrial ha resultado ser idóneo para nuestra empresa. Puesto que las diferencias de secuencia entre las especies son más numerosas que en el ADN del núcleo celular, resulta más probable que segmentos cortos de ADN mitocondrial distingan especies diferentes. Añádase que el ADN mitocondrial, al abundar más que el nuclear, se recupera

TOMMY MOORMAN (*ilustraciones*); FUENTES: INSTITUTO CORIELL PARA LA INVESTIGACION MEDICA (*secuencias de gorila y chimpancé*); INSTITUTO DE LA BIODIVERSIDAD DE ONTARIO (*códigos de barras en color*)

con facilidad mayor, sobre todo de muestras pequeñas o degradadas.

Junto con nuestros colaboradores, hemos ensayado la eficacia del código de barras del CO1 en diferentes grupos de animales terrestres y marinos, de los polos al trópico, para comprobar que esta pequeña etiqueta de ADN está capacitada para identificar una especie. Los códigos de barras del CO1 distinguen un 98 por ciento de las especies identificadas en estudios taxonómicos precedentes. En el resto, reducen la identificación a pares o series limitadas de especies muy emparentadas; en general, linajes que se separaron hace poco tiempo o que hibridan con frecuencia.

Armados con el código de barras genético, el siguiente paso consiste en compilar una biblioteca de referencia de este segmento a partir de los especímenes cuya identidad está ya bien establecida. Al comparar el ADN del código de barras de un organismo con los especímenes "testigo", se podrá determinar si aquél pertenece a una especie conocida o corresponde a un nuevo hallazgo. La creación de la biblioteca es simple: se obtiene el ADN de una muestra de tejido, se determina la secuencia de pares de bases del segmento correspondiente al código de barras y se introduce la información en una base de datos. La obtención de especímenes, en cambio, entraña mayor complejidad. Aunque el grado de variación dentro de cada especie es bajo, deben analizarse por lo menos diez individuos por especie para registrar su diversidad.

Aunque los museos de todo el mundo albergan en conjunto más de 1500 millones de especímenes, la mayoría no fueron preparados teniendo en mente una posterior recuperación del ADN. Muchos de los especímenes son demasiado viejos para producir secuencias completas de código de barras. En los especímenes más antiguos que se utilizan de referencia para los nombres taxonómicos, la amplificación de un código de barras de entre 100 y 200 pares de bases (un tamaño que suele poder recuperarse de un ADN antiguo o deteriorado) proporciona, la mayoría de las veces, información suficiente para demostrar la pertenencia a una especie, de la misma manera que el código de barras completo de los especímenes más recientes. Para ayudar a la construcción de la biblioteca de códigos de barras, numerosos investigadores han comenzado a reunir grandes colecciones de tejidos que se almacenan en las condiciones exigidas para la conservación del ADN.

Seguir la pista de tantos especímenes y de sus secuencias plantea un reto técnico. El proceso arrancó con la fundación de la base de datos pública BOLD (de "Barcode of Life Data Systems", sistema de datos del código de barras de la vida, www.barcodinglife.org). El BOLD cuenta con más de 460.000 archivos, referentes a más de 46.000 especies de todo el reino animal; incluye una cantidad

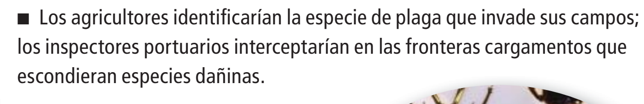
EL RETO SINGULAR DE LAS PLANTAS

El gen que se utiliza para la obtención en animales del código de barras genético no resulta práctico para las plantas, debido a que el genoma vegetal ha seguido su propia evolución. Además, mientras la incapacidad de dos grupos para aparearse de manera eficaz permite discriminar entre animales, muchas especies vegetales sí hibridan, lo que difumina las fronteras genéticas. En la actualidad, museos, universidades y jardines botánicos de todo el mundo analizan varios genes muy prometedores que podrían servir de código de barras para el reino vegetal.

APLICACIONES EN EL MUNDO REAL

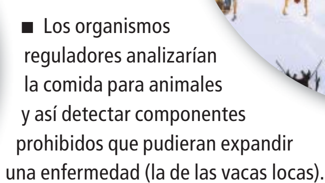
Una vez esté disponible un lector portátil de códigos de barras que examine muestras de tejido y se conecte a una base de datos, se prevén numerosas aplicaciones:

- Los biólogos identificarían organismos en el campo, lo que facilitaría el estudio de la biodiversidad.
- Las autoridades sanitarias ➤ identificarían mosquitos transportadores de agentes infecciosos (virus del Nilo Occidental y otros vectores de enfermedades), gracias a lo cual cabría la aplicación a tiempo de métodos de control dirigidos.
- Los propietarios de restaurantes ➤ y consumidores controlarían el pescado para comprobar que lo que están comprando coincide con lo anunciado.
- Los taxonomistas identificarían genéticamente especímenes distintos, lo que aceleraría la catalogación de especies nuevas antes de que se extinguieran.



- Los agricultores identificarían la especie de plaga que invade sus campos; los inspectores portuarios interceptarían en las fronteras cargamentos que escondieran especies dañinas.
- Los médicos diagnosticarían con prontitud patógenos fúngicos y parásitos, como el agente de la malaria.
- Los museos analizarían ➤ los especímenes que se acumulan en sus cajones, lo que les ayudaría a descubrir especies no descritas.





- Los organismos reguladores analizarían la comida para animales y así detectar componentes prohibidos que pudieran expandir una enfermedad (la de las vacas locas).

TOMMY MOORMAN (*hoja*); NOAH PORITZ *Photo Researchers, Inc.* (*mosquito*); SCOTT CAMAZINE *Photo Researchers. Inc.* (*insectos*); TOM HOPKINS *Aurora Photos* (*filetes de pescado*)

Los autores

Mark Y. Stoeckle pertenece al cuerpo docente del Programa para el Medio Humano de la Universidad Rockefeller. Se licenció en la Universidad de Harvard. Es también profesor de medicina en la facultad de medicina Weill de la Universidad de Cornell. **Paul D. N. Hebert** se doctoró en genética en la Universidad de Cambridge. Contratado por la Universidad de Guelph, dirige el Instituto de Biodiversidad de Ontario.

ingente de datos, sobre todo de aves, peces y mariposas. Cada registro anota el nombre de la especie, la secuencia del código de barras genético, la ubicación de la colección, enlaces al espécimen testigo, fotografías y otros datos biológicos. El Consorcio para el Código de Barras de la Vida (CBOL, por sus siglas en inglés) se formó en 2005 para coordinar el enorme esfuerzo que suponía la creación de tan exhaustiva biblioteca.

El consorcio cobija 150 instituciones de 45 países que apoyan el desarrollo del código de barras genético como una normativa universal para la identificación de especies. La recopilación de datos será dirigida por el Proyecto Internacional del Código de Barras de la Vida, una asociación de 25 países que tiene previsto procesar cinco millones de especímenes de 500.000 especies para el 2014.

Los primeros resultados

Como señala E. O. Wilson, a pesar de 250 años de esfuerzo, no conocemos, ni siquiera en un orden de magnitud próximo, el número de especies que viven en la Tierra. Los códigos de barras de ADN ayudan a acelerar la catalogación de la biodiversidad. Uno de los principales descubrimientos realizados hasta la fecha es que el número de especies es mayor de lo que se creía. Ese hallazgo ha resultado de la información que los códigos de barras genéticos han proporcionado sobre las especies crípticas, organismos iguales en apariencia pero cuyas diferencias genéticas revelan que corresponden a especies distintas.

Los análisis de códigos de barras genéticos han descubierto especies crípticas, perdidas en los cajones de los museos, en cada grupo estudiado hasta la fecha. Hebert, junto con Daniel Janzen, de la Universidad de Pennsylvania, John Burns, de la Institución Smithsoniana, y sus colaboradores de Costa Rica encontraron que lo que se pensaba era una especie de mariposa de la familia de los Hespéridos (Hesperiidae), *Astraptes fulgerator*, correspondía a diez especies distintas, por lo menos. Puesto que los adultos guardan una estrecha semejanza, los científicos no se dieron cuenta de las notables diferencias genéticas. El grupo dirigido por Alex Smith, del Instituto de la Biodiversidad de Ontario, descubrió que tres especies de moscas que se reconocían por su morfología y parasitaban insectos diversos, correspondían a un conjunto de quince especies; cada linaje se especializa en unos pocos huéspedes. El trabajo realizado por uno de los autores (Stoeckle) muestra que incluso en un grupo muy estudiado, como las aves de América del Norte, el cuatro por ciento de las especies caracterizadas presentan distintos linajes genéticos, correspondientes, con probabilidad, a especies diferentes.

Otro descubrimiento destacable es la diversidad genética mitocondrial dentro de la

CLASIFICACION DE MARIPOSAS

Las orugas de la mariposa hespérida *Astraptes fulgerator* en Costa Rica divergen en apariencia, hábitat y dieta. Los adultos, en cambio, presentan un aspecto muy similar. Durante mucho tiempo se dio por sentado que pertenecían a la misma especie. La codificación de barras elimina semejantes confusiones. Considerando que la variación en el gen *CO1* guarda correlación con la apariencia, estilo de vida y alimentación preferida de las orugas, se ha determinado que, a pesar de la apariencia externa de los adultos, las mariposas se dividen en 10 especies.



DANIEL JANZEN *Universidad de Pennsylvania*

Los autores responden a algunas objeciones

Un proyecto científico de la ambición de la codificación en barras del ADN hará que la financiación sea aún más escasa para las disciplinas cenicientas, como la taxonomía.

No hay pruebas de que la codificación en barras esté recortando el presupuesto para otras disciplinas. Es más, las fuentes de financiación para la codificación en barras, que incluyen fundaciones privadas (Fundación Alfred P. Sloan, Fundación Gordon y Betty Moore) y organismos públicos (Genoma Canadá), son nuevas fuentes de financiación para la taxonomía.

Los códigos de barras del ADN con frecuencia no distinguen entre especies muy cercanas o que han divergido hace poco.

Las especies muy jóvenes indistinguibles mediante el código de barras genético constituyen una fracción insignificante; a menudo resulta difícil su identificación específica por los métodos al uso. Algunos de estos casos corresponden a especies que los taxónomos separaron incorrectamente o que se hallan en proceso de formación. La codificación en barras del ADN ayuda a descubrir los casos que requieren una revisión taxonómica.

El gen mitocondrial utilizado por código de barras no criba con precisión las especies animales, ni puede aplicarse a determinados grupos taxonómicos.

Entre los grupos taxonómicos que han demostrado la eficacia de los códigos de barras genéticos hemos de mencionar murciélagos, abejas, quitones, almejas, copépodos, peces, ranas, moscas del vinagre, efímeras, nemátodos, arañas, esponjas y colémbolos. Por ahora, hay pocos grupos animales que no se distingan por el código de barras de ADN. De hecho, muchas especies animales no pueden ser diferenciadas por los métodos tradicionales o requieren un instrumental caro y una pericia extraordinaria; en cambio, se identifican fácilmente mediante la técnica del código de barras genético.

La codificación en barras del ADN no tiene nada de novedoso, es puro marketing.

El concepto que subyace bajo esta técnica se remonta a Carl Woese, de la Universidad de Illinois, que hace treinta años descubrió que podrían utilizarse secuencias de ADN para reconstruir el árbol de la vida. Sin embargo, la idea de establecer un sistema de identificación para el reino vegetal y el reino animal mediante las secuencias genéticas de un locus uniforme se planteó en 2003; además, las bibliotecas de códigos de barras de ADN se han comenzado a acumular en los últimos tres o cuatro años. Lo que también es nuevo y añade eficacia al sistema es que a cada archivo de código de barras se le anexa un conjunto uniforme de datos.

mayoría de las especies animales: ha resultado sorprendentemente baja. Una observación que contradice aquella predicción de la teoría de la genética de poblaciones que propone que las poblaciones más antiguas o extensas deberían mostrar mayor diversidad. A menudo se declara que bajos niveles de variación indican recientes cuellos de botella poblacionales (un cuello de botella corresponde a la reducción de una población a unos pocos individuos). Por ejemplo, la ausencia relativa de variación mitocondrial en la población humana se asociaba a una situación que puso al borde de la extinción de los primeros humanos en el este de Africa hace 150.000 años. Según esa hipótesis, todos los humanos modernos tienen su origen en una sola hembra de esa época: la "Eva mitocondrial". El descubrimiento de que la norma en el reino animal serían niveles de diversidad genética empobrecidos de forma similar pone en cuestión la hipótesis de Eva y plantea una pregunta más amplia, no resuelta: ¿Qué fuerzas limitan la diversidad mitocondrial dentro de las especies? Varios investigadores creemos que esos niveles de divergencia de secuencia, sistemáticamente bajos, reflejan "barridos selectivos", en los que mutaciones nuevas y favorables desplazan a variaciones arcaicas, de modo que se reduce la diversidad dentro de las especies.

Hasta el momento, nuestra investigación ha demostrado que la obtención de códigos de barras genéticos acelera el estudio de la biodiversidad. La realidad sigue siendo terca: se tardan años en completar la descripción formal de las especies nuevas. La generación de datos de secuencias va muy por delante de las descripciones oficiales. La obtención de códigos de barras genéticos está creando un mapa de diversidad del ADN que servirá de base para un estudio detallado posterior. Al igual que la velocidad y economía de la fotografía aérea hicieron que ésta suplantara a los levantamientos terrestres en los estudios topográficos, la codificación en barras del ADN constituye un primer paso, rápido y barato, para el descubrimiento de especies. La "validación en el terreno" llevará más tiempo. Pero de la unión de ambos abordajes emergerá una panorámica de la historia y la existencia actual de la vida en la Tierra, amén de preservar la vida en toda su grandeza para los siglos venideros.

Bibliografía complementaria

BIOLOGICAL IDENTIFICATIONS THROUGH DNA BARCODES. Paul D. N. Hebert, Alina Cywinska, Shelley L. Ball y Jeremy R. deWaard en *Proceedings of the Royal Society B*, vol 270, n.º 1512, págs, 313-321; 7 de febrero, 2003.

El Consorcio para el Código de Barras de la Vida (CBOL) es una iniciativa internacional dedicada a desarrollar códigos de barras de ADN normalizados para la identificación de especies. Tiene su sede en el Museo Nacional de Historia Natural de la Institución Smithsoniana: www.barcoding.si.edu.

"The Barcode Blog", de Mark Y. Stoeckle, es una bitácora científica ilustrada semanal sobre secuencias cortas de ADN para la identificación y el descubrimiento de especies: http://phe.rockefeller.edu/barcode/blog.

LA CIENCIA DE LA RED

El estudio de la Red permitirá utilizar mejor la información, impedirá la suplantación de identidades, revolucionará la industria y hará más fecunda la parte de nuestra vida que transcurre "en línea"

Nigel Shadbolt y Tim Berners-Lee

CONCEPTOS BASICOS

- El imparable aumento de páginas y enlaces de la Red está gestando en ella nuevas propiedades, de las redes sociales a la suplantación de la personalidad virtual, que van transformando la sociedad.
- Una nueva disciplina, la ciencia de la Red, ambiciona descubrir cómo surgen las características de la Red y cómo sacar partido de ellas en beneficio de la sociedad.
- Se están cosechando importantes beneficios. Con más trabajo seguramente se podrán resolver problemas de gran importancia, como la garantía de la privacidad o el refuerzo de la mutua confianza.

La eclosión de la *World Wide Web* —la Red— a mediados de los noventa se ha tornado explosión. Cuenta hoy con unos 15.000 millones de páginas, que tocan casi todos los aspectos de la vida moderna. Crecen sin cesar los puestos de trabajo que dependen de la Red, que por otra parte está provocando una revolución en los medios, la banca o los sistemas sanitarios. Hay gobiernos que estudian el modo de gestionar sus países por medio de ella. En cambio, apenas se percibe que la Red es mucho más que la suma de sus páginas. Afloran en ella propiedades emergentes que están transformando la sociedad. El correo electrónico dio paso a la mensajería instantánea, que a su vez ha engendrado las redes sociales, como Facebook. La transferencia de documentos dio vida a los portales para compartir archivos, como Napster, que han evolucionado hacia sitios del estilo de YouTube, generados por los usuarios mismos. El etiquetado de contenidos está creando comunidades en línea en las que se puede compartir de todo, desde noticias sobre conciertos hasta consejos para la educación de los hijos.

No abundan quienes estudien cómo han ido tomando cuerpo todas estas propiedades emergentes, cómo ponerlas a nuestro servicio, qué nuevos fenómenos están en camino o lo que todo esto podría suponer para la Humanidad. Una nueva rama de la ciencia —la ciencia de la Red— se propone abordar tales cuestiones. Los hitos siguen el paso de la historia: primero se construyeron las computadoras, y vinieron las ciencias de la computación. La ciencia de la Red recibió su bautismo como disciplina formal en noviembre de 2006, cuando los autores de este artículo y colegas del Instituto de Tecnología de Massachusetts y de la Universidad de Southampton anunciaron la "Iniciativa para la investigación en ciencia de la Red" *(Web Science Research Initiative*). Desde entonces, se han sumado a este empeño investigadores de dieciséis de las universidades más importantes del mundo.

La nueva disciplina se propone confeccionar modelos de la estructura de la Red, enunciar los principios arquitectónicos que dan sostén a su colosal crecimiento, descubrir las causas motrices de las interacciones humanas en línea y el modo en que pueden cambiar las convenciones sociales. Tratará de elucidar los principios que aseguren el crecimiento productivo de la Red y abordará problemas complejos, como la protección de la privacidad o los derechos de propiedad intelectual. Para lograr tales fines, la ciencia de la Red recurrirá a las matemáticas, la física, las ciencias informáticas, la psicología, la ecología, el derecho o las ciencias políticas y económicas.

CARY WOLINSKY; MATTHEW HURST *Microsoft Live Labs* (*http://datamining.typepad.com/data_mining*) (*imagen de la blogosfera*)

No es posible, obviamente, vaticinar lo que esta empresa en gestación nos reportará. Pero la ciencia de la Red ha hecho aflorar ya nociones de importancia crucial, y aquí mostraremos algunas. Su propósito es, en última instancia, dar respuesta a ciertas cuestiones fundamentales. ¿Cuáles han sido las pautas evolutivas que han promovido el crecimiento de la Red? ¿Podrían quemarse? ¿Cómo surgen puntos críticos y cómo se los puede controlar?

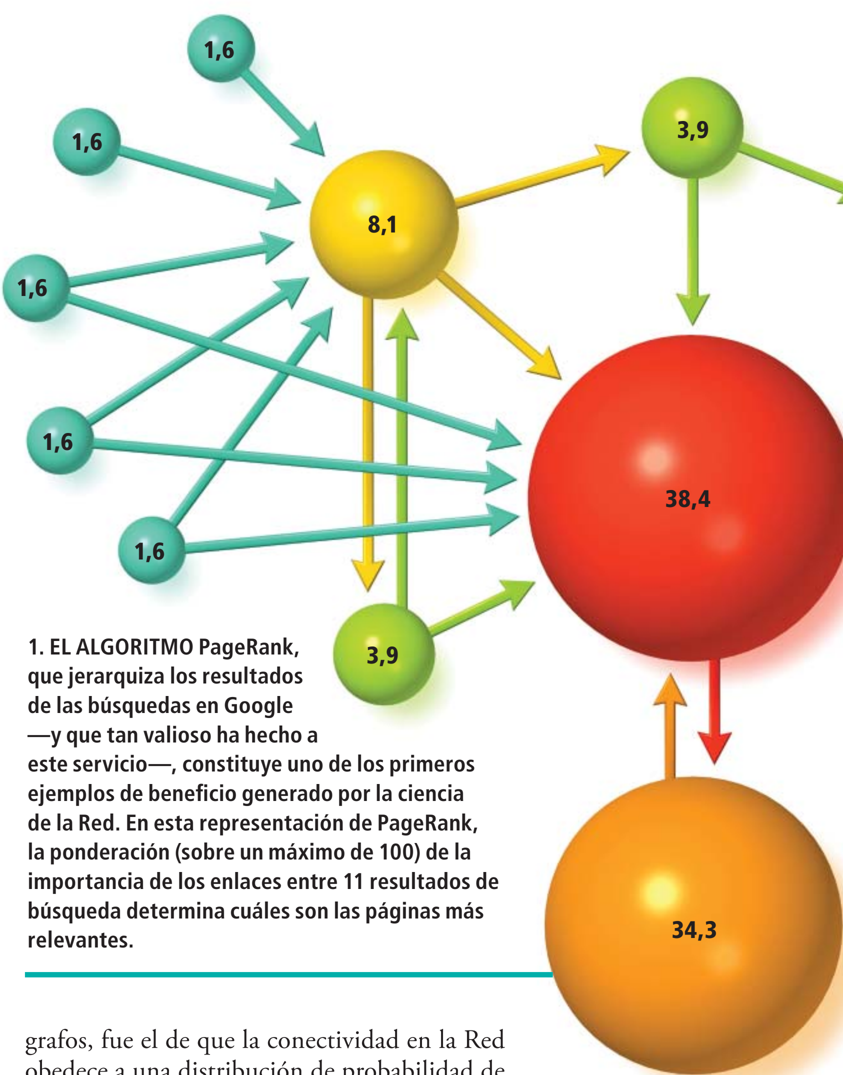
Lo que ya sabemos

En cuanto disciplina formal, la ciencia de la Red es neonata, pero investigaciones anteriores permiten barruntar las posibilidades que ofrece. En los años noventa, la búsqueda de información por palabras clave estaba generando volúmenes crecientes de información irrelevante, debido, en parte, a la celeridad con la que aumentaba el número de páginas. Larry Page y Sergey Brin, fundadores de Google, vieron nítidamente la necesidad de jerarquizar los resultados.

Su idea feliz consistió en percatarse de que la importancia de una página —su relevancia— era función del número y la importancia de las páginas que contenían enlaces a ella. Hay una dificultad: esta definición es, en parte, recursiva, pues la importancia de una página depende de la importancia de las páginas con las que enlaza, cuya importancia, a su vez, está determinada por la de las vinculadas a ellas. Page y Brin idearon una brillante formulación matemática para representar esta propiedad y desarrollaron un algoritmo, al que llamaron PageRank, que aprovechaba dicha recursividad y lograba mostrar las páginas que ofrecía ordenadas por relevancia.

El éxito de Google ha demostrado que la Red ha de entenderse y necesita ser moldeada por la ingeniería. La ciencia de la Red atiende a estos dos propósitos. La Red constituye una infraestructura de lenguajes y protocolos: es una obra de ingeniería. Pero bajo las propiedades emergentes subyace siempre la vinculación de contenidos. Algunas de estas propiedades son deseables y, por ello, objeto de ingeniería. Por ejemplo, la garantía de poder vincular una página a otra cualquiera le confiere potencia a la Red, tanto local como globalmente. Otras propiedades, en cambio, son indeseables y, si es posible, la ingeniería debería eliminarlas, como, sea por caso, la construcción de sitios dotados de miles de enlaces artificiales, generados por programas robot, con la intención de mejorar la graduación del sitio para lograr que ascienda en la tabla: son las llamadas "granjas de enlaces".

Otro de los primeros descubrimientos, procedente esta vez de la teoría de



1. EL ALGORITMO PageRank, que jerarquiza los resultados de las búsquedas en Google —y que tan valioso ha hecho a este servicio—, constituye uno de los primeros ejemplos de beneficio generado por la ciencia de la Red. En esta representación de PageRank, la ponderación (sobre un máximo de 100) de la importancia de los enlaces entre 11 resultados de búsqueda determina cuáles son las páginas más relevantes.

GEORGE RETSECK

grafos, fue el de que la conectividad en la Red obedece a una distribución de probabilidad de tipo potencia: la probabilidad de que un nodo cuente con k enlaces es proporcional a una potencia negativa de k. En muchas redes, casi todos los nodos cuentan —groseramente— con parecido número de enlaces. Pero en la Red existen, por una parte, unas pocas páginas vinculadas con muchísimas más y, por otra, un gran número de páginas que enlazan sólo con muy pocas. La expresión "red sin escala" fue acuñada por Albert-László Barabási, de la Universidad del Noroeste [*véase* "Redes sin escala"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 2003]. Mucha fue la sorpresa, pues se daba por hecho que las páginas de la Red tendrían, en general, un número de enlaces próximo al promedio.

En las redes sin escala, aunque se elimine la mayoría de los nodos, todavía es muy probable que entre cada par de nodos supervivientes siga existiendo algún camino que los conecte. Sin embargo, la supresión de un número relativamente pequeño de nodos muy conectados —los *hubs*, o "cubos", por analogía con el cubo de una rueda y sus radios, o "concentradores"—, provoca una gran desintegración. Este análisis ha resultado de crucial importancia para las empresas y organizaciones que diseñan el encaminamiento de datos por la Red —trátese de proveedores de telecomunicaciones o de laboratorios de investigación—, pues aconseja integrar en ellas una sustancial redundancia que equilibre el tráfico y haga la Red más robusta frente a los ataques.

El conocimiento profundo de las redes sin escala, obtenido de los análisis de la Red, ha propiciado el análisis de otros sistemas reticulares. Se han observado distribuciones de tipo potencia en campos tan alejados como las citas bibliográficas en los trabajos científicos o las alianzas empresariales. Estos trabajos han contribuido, por ejemplo, a que el Centro de Control y Prevención de Enfermedades de EE.UU. haya perfeccionado sus modelos de propagación de enfermedades de transmisión sexual y, en biología, ha facilitado la comprensión de las interacciones entre proteínas.

La Red, según el análisis científico, se caracteriza por poseer caminos cortos y mundos pequeños. En los años noventa, en la Universidad Cornell, Duncan J. Watts y Steven H. Strogatz hicieron ver que aunque la Red fuese enorme, les era posible a los usuarios llegar desde una página a cualquier otra mediante 14 clics de ratón como máximo. Para entender plenamente estas características es necesario entender que la Red constituye una red social. Hace unos cuarenta años, Stanley Morgan, psicólogo de la Universidad de Harvard, le pidió a gente de Omaha (en el estado de Nebraska) que tratasen de enviar un paquete a un residente en Boston, a más de 2000 kilómetros de distancia, sin otros datos que su nombre y ciertos rasgos descriptivos generales. Los remitentes habían de enviar el paquete a la persona a la que juzgaran más apta para localizar al destinatario final; esta segunda persona podía remitir el envío a una tercera, y así sucesivamente. De los casi 300 envíos, llegaron a su destino previsto 64, a través de un promedio de seis intermediarios, lo que sirvió de fundamento a la expresión "seis grados de separación".

Sin embargo, más recientemente, Watts, ahora en la Universidad de Columbia, trató de reproducir el experimento con un mensaje de correo electrónico, que tendría que haber sido expedido por la Red, pero tuvo muchos fracasos. En particular, si los individuos carecían de incentivo para propagar el mensaje, interrumpían la comunicación. Aun así, las cosas mejoraron con incentivos muy ligeros.

La lección es que la estructura reticular no lo es todo por sí sola; las redes prosperan a la luz de los actos, estrategias y percepciones de los individuos incrustados en ellas. Para

DESVELAR LA ORIENTACION SEXUAL

Carter Jernigan y Behram Mistree, estudiantes del MIT, han estudiado las comunidades de Facebook. Se ha observado que la estructura identifica la probable orientación sexual de individuos aunque no hayan manifestado explícitamente sus preferencias. El motivo es que quienes sí la han declarado propenden a conectarse más frecuentemente con otras personas de similar orientación; surge de ahí una especie de triangulación. Los resultados de este tipo plantean problemas de tipo ético y de respeto a la privacidad. Si se investigase más sobre la estructura de la Red y sobre sus usuarios, seguramente se encontrarían soluciones.

conocer de forma realista por qué la Red posee una estructura beneficiosa de caminos cortos, necesitamos saber qué mueve a quienes aportan contenidos a vincularlos a otro material. Los motores sociales —los propósitos, deseos, intereses y actitudes— constituyen aspectos fundamentales en la formación de enlaces. Para comprender la Red tan necesarias son las ideas tomadas de la sociología y la psicología como las que proceden de las matemáticas o de las ciencias de cómputo.

De micro a macro

Una de las grandes cuestiones que la ciencia de la Red se propone explorar es cómo una pequeña innovación técnica puede desencadenar un fenómeno social de gran magnitud. Tenemos un llamativo ejemplo en la "blogosfera". Aunque los primeros navegadores de la Red proporcionaban métodos sencillos para que el usuario medio "publicase" sus ideas, a partir de 1999 los programas para la confección de blogs facilitaron mucho la tarea. La chispa prendió y se tornó incendio, porque al tiempo que unas personas daban suelta a lo que sentían o pensaban, descubrían a otras de similares opiniones y, entre todas, podían ensamblar una comunidad de opiniones parecidas.

Resulta difícil estimar con precisión el tamaño de la blogosfera. El principal motor de búsqueda de blogs, el Technorati de David Sifry, estaba rastreando ya en el pasado mes de mayo más de 112 millones de blogs repartidos por todo el mundo; en esa cifra tal vez se cuente sólo una fracción de las 72 millones que se presumen en China. Pero sea el que fuere su tamaño, su explosivo crecimiento exige una explicación. Se puede defender que la introducción de mecanismos muy sencillos, y en especial el TrackBack, ha facilitado ese crecimiento. Si un bloguero aporta un comentario o alude a una entrada publicada en otro blog, TrackBack se lo notifica al blog original. Esta notificación permite al blog original presentar resúmenes de todos los comentarios y enlaces a ellos. Surgen así conversaciones que abarcan varios blogs y que rápidamente forman redes de individuos interesados en temas determinados. Lo mismo que antes, una gran porción de la estructura blog se encuentra vinculada mediante caminos cortos. Ello vale no sólo para los blogs y los blogueros mismos, sino también para los temas abordados y las entradas efectuadas.

Al tiempo que florecían los blogs se fueron creando rápidamente instrumentos interesantes, amén de técnicas de medición y de recopilación de datos, orientados a rastrear la diseminación de temas por el blogoespacio. Matthew Hurst, analista de medios sociales de Microsoft Live Labs, estuvo recopilando datos de enlaces durante seis semanas y preparó con ellos una "carta de navegación" de las porciones más activas e interconectadas de la blogosfera (*véase la figura 2*). En ella se aprecia que cierto número de blogs son masivamente populares y reciben a diario unas 500.000 visitas. Si en una de éstas aparece un enlace o una mención a otra bitácora, se genera tráfico intenso en esa dirección. En esta "carta de navegación" se aprecia asimismo la existencia de islotes semiaislados de individuos que se mantienen en estrecho y continuo contacto mutuo, pero que apenas conectan con otros autores de blogs.

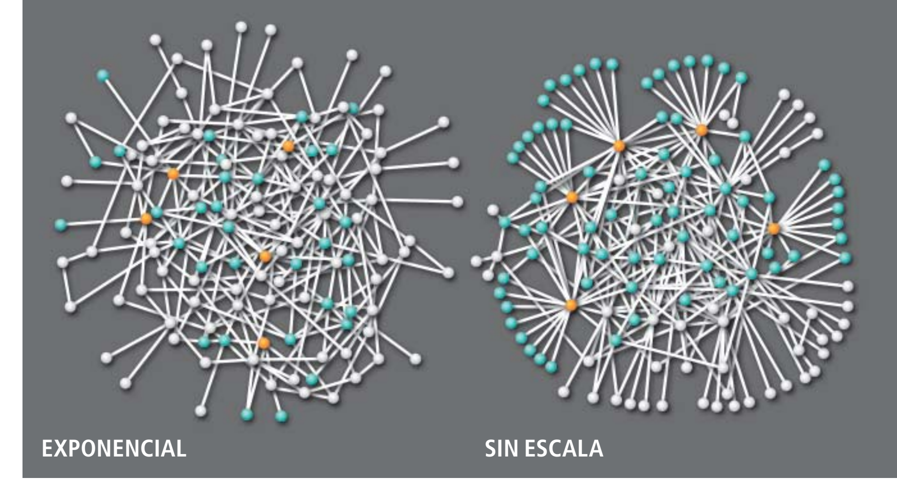
Utilizada correctamente, la blogosfera puede constituir un poderoso medio para la difusión de una idea, para la calibración del impacto de una iniciativa política o para la previsión del éxito comercial de un producto. El lanzamiento al mercado del iPhone de Apple, que había sido muy publicitado, generó el 1,4 por ciento de las nuevas entradas de blog en el día de su puesta a la venta. Uno de los problemas consiste en comprender de qué modo podría esta diseminación reorientar nuestra concepción del periodismo y de los comentaristas. ¿Qué mecanismos pueden asegurarles a los lectores de los blogs que los hechos citados son fidedignos? La ciencia de la Red puede facilitar métodos para verificar esa "fuente de información", a la vez que ofrece reglas prácticas sobre las condiciones que rodean su uso

Los autores

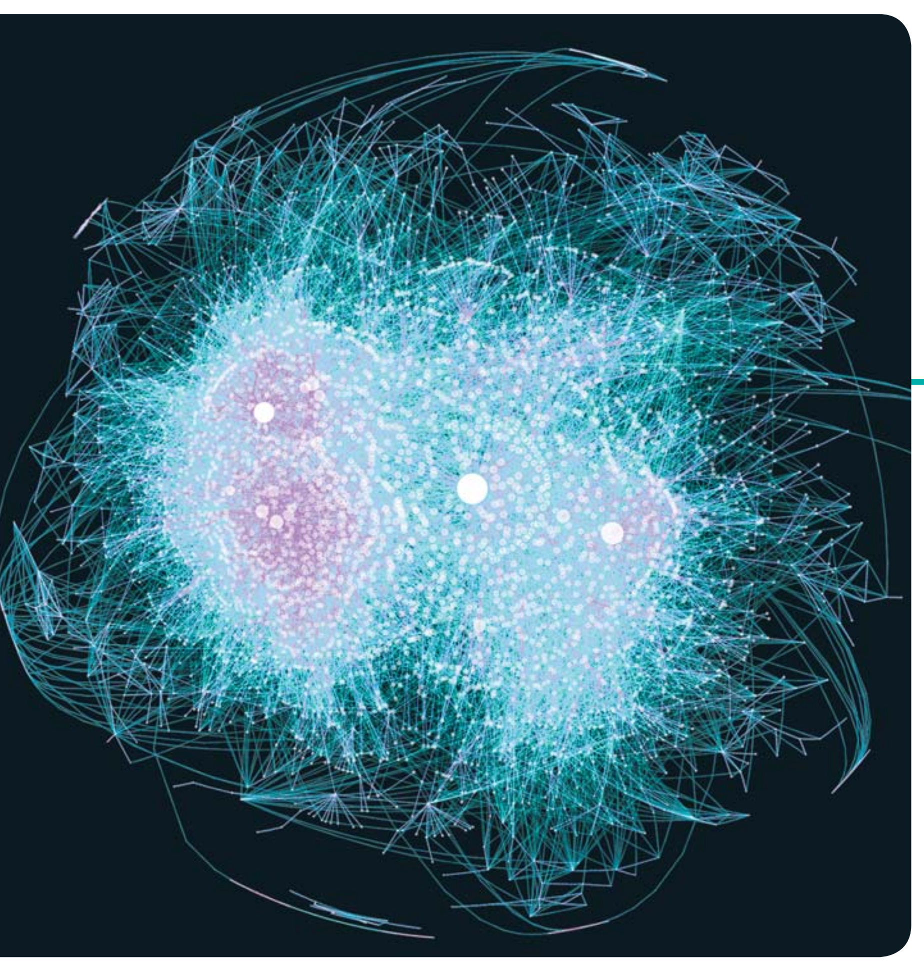
Nigel Shadbolt enseña inteligencia artificial en la Universidad de Southampton. Dirige Garlik Ltd., empresa dedicada a la Red Semántica. Ha sido presidente de la Sociedad Británica de Ordenadores. **Tim Berners-Lee** fue el inventor de la Red y encabeza el World Wide Web Consortium, que tiene su sede en el MIT.

Construcción de una Red más segura

El conocimiento de cómo se establecen enlaces en la Red podría revelar métodos más eficaces para articularla. Muchas redes son francamente homogéneas (una estructura "exponencial"): sus nodos, incluso los más activos (*color anaranjado*), y sus vecinos inmediatos (*en azul*) cuentan aproximadamente con el mismo número de enlaces entrantes y salientes. Pero un análisis efectuado en la Universidad de Notre Dame ha hecho ver que la Red constituye una estructura "sin escala", en la que unos cuantos nodos (portales de la Red) tienen muchos enlaces entrantes, en tanto que muchísimos otros cuentan sólo con unos pocos.



FUENTE: "ERROR AND ATTACK TOLERANCE OF COMPLEX NETWORKS," POR RÉKA ALBERT, HAWOONG JEONG, ALBERT-LÁSZLÓ BARABÁSI ET AL., EN *NATURE*, VOL. 406; 27 DE JULIO, 2000 (*red sin escala*)



2. LA BLOGOSFERA presenta ciertas pautas de poder. Matthew Hurst ha rastreado los vínculos mutuos de los blogs. En esta visualización (*a la izquierda*) cada blog está representada por un punto blanco; hay unas cuantos —puntos de gran tamaño— enormemente populares. Los blogs que comparten muchas citaciones mutuas forman comunidades diferenciadas (*en color violeta*). Los grupos aislados que se comunican frecuentemente entre sí, pero raramente con los demás, están representados mediante líneas que contornean los bordes.

MATTHEW HURST *Microsoft Live Labs (http://datamining.typepad.com/data_mining) (imagen de la blogosfera)*

repetido. Y eso es precisamente lo que Daniel Weitzner, del MIT, está haciendo con su "iniciativa para la extracción de datos transparente y responsable".

Semántica en alza

Un fenómeno que se está beneficiando de investigaciones concertadas es el alza de la Red Semántica, una red de datos en la Red. Entre sus muchas ventajas, la Red Semántica promete dar respuestas mucho más acertadas a nuestras preguntas. En nuestros días, una búsqueda genérica, tal como "Toyota usados Cataluña 8000 euros", produce unas 9000 páginas genéricas. Cuando se añaden las prestaciones de la Red Semántica, se recibirá en cambio información detallada sobre media docena de vehículos concretos, que especificará su precio, color, kilometraje, estado y propietarios, amén de cómo proceder para comprarlos.

Han sido ideados ya sólidos cimientos para la Red Semántica; sobre todo, su lenguaje primario, una sintaxis para la descripción de recursos, el *Resource Description Framework* (RDF), que se superpone al lenguaje de hipertexto HTML básico y a otros protocolos que dan forma a las páginas de la red. Este descriptor de recursos confiere significado a los datos mediante conjuntos de "ternas". Cada terna imita el esquema sujeto-verbo-objeto de la forma más simple de oración gramatical. Una terna podría afirmar, por ejemplo, que la "persona X" [sujeto] "es hermana de" [sintagma verbal] "persona Y" [objeto]. Una serie de ternas pueden determinar que [coche X][es marca][Toyota]; que [coche X][es clase][usado]; que [coche X][cuesta][7500 euros]; que [coche X][está en][Sabadell]; que [Sabadell][está en][Cataluña]. Todas estas ternas, tomadas conjuntamente, pueden determinar que el coche X constituye realmente una respuesta adecuada a nuestra petición. Esta sencilla estructura en ternas proporciona una forma natural para la descripción de la mayoría de los datos procesados mediante máquinas. Los sujetos, verbos y objetos (o predicados) se encuentran individualmente identificados mediante un identificador universal de recursos, URI o *Universal Resource Identifier*, que es una dirección como las utilizadas para las páginas de la Red. Así pues, cualquiera puede definir un concepto nuevo, o un verbo nuevo, definiendo en la Red el URI correspondiente.

Conforme vaya creciendo el número de estas definiciones y de sus vínculos mutuos,

¿Te va el tenis?

La ciencia de la Red está generando instrumentos capaces de "comprender" los datos en línea (lo que se denomina Red Semántica). Facilitan así resultados muy enfocados. Uno de estos empeños, DBpedia, logra evaluar la información contenida en las infoboxes de las páginas de la Wikipedia. Por ejemplo, para hallar todos los jugadores de tenis residentes en Moscú basta rellenar un formulario sencillo (*abajo*) para obtener una lista breve y exacta de resultados (*a la derecha*).

Sujeto	Predicado	Objeto
persona	reside en	Moscú
persona	tipo	jugador tenis

Semantic Wiki...

Nr.	?person
1	Igor Andreev
2	Elena Dementieva
3	Vera Zvonareva
4	Dinara Safina
5	Maria Kirilenko
6	Anna Chakvetadze
7	Anastasia Myskina
8	Mikhail Youzhny
9	Tatiana Golovin
10	Elena Bovina
11	Dmitry Tursunov
12	Olga Poutchkova
13	Anna Kournikova
14	Nadia Petrova
15	Marat Safin

3. SECOND LIFE y otros mundos virtuales se están construyendo por muchos entusiastas. Cada uno aporta pequeños elementos —por ejemplo, tiendas o productos—, que sumados constituyen una galería comercial virtual donde personas reales pueden valerse de "sosias" en línea para comprar allí. Tales creaciones suscitan complejos problemas sobre la titularidad de propiedades intelectuales que la ciencia de la Red confía en poder resolver.

especialistas y entusiastas irán definiendo taxonomías y ontologías, vale decir, conjuntos de datos que describan clases de objetos y relaciones entre ellos. Estos conjuntos harán posible que los ordenadores, allí donde estén, encuentren, comprendan y expongan informaciones debidamente enfocadas.

Son muchos los grupos que ya se encuentran construyendo estructuras para la Red Semántica, sobre todo en biología y en ciencias de la salud [*véase* "La Red Semántica en acción"; Investigación y Ciencia, febrero de 2008]. Fueron más de 1000 los asistentes al congreso sobre Tecnología Semántica, celebrado el pasado mes de mayo en San José, en California. La ciencia de la Red ofrece la perspectiva de crear métodos más poderosos para definir, vincular e interpretar datos.

El mundo wiki ofrece un buen ejemplo de lo muy útil que puede resultar esa explotación de datos vinculados. La Wikipedia, enciclopedia "en línea" generada por personas de todo el mundo, cuenta con más de dos millones y medio de artículos en inglés y más de 400.000 en castellano. Los artículos contienen texto ordinario y plantillas insertas, o *infoboxes*, que son conjuntos de datos. Existen en la actualidad más de 700.000 de estas plantillas, y se están buscando formas de extraer datos en ellas. Uno de estos proyectos es el llamado DBpedia, emprendido por Chris Bizer y sus colaboradores de la Universidad Libre de Berlín y la Universidad de Leipzig. Han ideado un instrumento del mismo nombre (disponible en http://wikipedia.aksw.org), que se vale de técnicas de Red Semántica para indagar en las *infoboxes*. Permite, por ejemplo, preguntar por todos los jugadores de tenis que residen en Moscú, o los nombres de las ciudades de EE.UU. que se encuentran por encima de los 1000 metros de altitud y obtener respuestas acertadas.

Nos gustaría, como es natural, disponer de un instrumento similar para toda la Red. Mas, para desarrollarlo, sería necesario que cada vez fueran más los datos de la Red representados por conjuntos vinculados mediante RDF. Entretanto, está resultando claro que las estructuras de enlaces de DBpedia obedecen a distribuciones de probabilidad de tipo potencia, como las descubiertas en la Red. Al igual que algunas páginas ocupan



un rango más elevado en la Red de documentos, así ocurrirá con los datos de la Red Semántica. Simultáneamente, las investigaciones realizadas por Oded Nov, de Instituto Politécnico de la Universidad de Nueva York, están empezando a determinar con certeza por qué los wikipedas insertan entradas en esa enciclopedia y las causas que motivan su actividad; los motivos psicológicos que se descubran contribuirán a averiguar el modo de incentivar a los usuarios para que hagan aportaciones a la Red Semántica.

Problemas futuros

Parece razonable afirmar que la ciencia de la Red puede contribuir a lograr una Red más eficiente. Como es obvio, no sabemos plenamente en qué consiste la ciencia de la Red, así que una parte de la nueva disciplina deberá consistir en determinar las nociones más fecundas que ayuden al propio desarrollo de la ciencia. Es posible que algunas de estas nociones sean fruto de la propia naturaleza interdisciplinar de la materia. Por ejemplo, conceptos nacidos en la biología, como el de plasticidad, podrían resultar útiles. El cerebro y el sistema nervioso se desarrollan y se adaptan a lo largo de nuestras vidas creando y eliminando conexiones entre las neuronas, células cerebrales que actúan como nodos de nuestro sistema nervioso. Se producen cambios en las conexiones en respuesta a la actividad de la red, entre los que se cuentan el aprendizaje, el desuso y el envejecimiento.

De forma análoga, las conexiones de la Red se degradan y crecen. La ciencia de la Red puede también explorar la posibilidad de protocolos que desconecten de la Red nodos sin actividad de entrada o salida. ¿Funcionaría más eficazmente esta red?

Nociones como las de dinámica de poblaciones, cadena trófica y consumidores y productores tienen traducción en la Red. Es posible que métodos y modelos ideados para la ecología nos ayuden a comprender el ecosistema digital de la Red, que podría resultar propenso a sufrir daños causados por acontecimientos aislados de gran intensidad (similares a huracanes) o por erosiones sutiles, aunque constantes (caso de las especies invasivas).

Será necesario examinar también todo un abanico de problemas jurídicos. Se están debatiendo ya leyes concernientes a la propiedad intelectual y los derechos de autor para creaciones digitales. Ya se han presentado problemas fascinantes en ambientes virtuales, como en Second Life. Por ejemplo, ¿son transferibles las leyes y títulos de propiedad a los mundos digitales, en los cuales millones de personas efectúan pequeñas aportaciones al contenido existente? Otra cuestión abierta es la posibilidad de integrar reglas de utilización en los propios contenidos. Un ejemplo de tal marco de referencia es Creative Commons, que permite a los autores, científicos, artistas o educadores marcar sus trabajos creativos con las libertades o restricciones que deseen. Y lo que es crucial, la marca proporciona también los datos RDF que describen la licencia, lo que facilita la localización automática de trabajos y permite saber las condiciones en que pueden ser utilizados. La ciencia de la Red podría determinar si las licencias del corte de Creative Commons afectan a la difusión de información.

Otra de las fuentes donde abrevar es la sociología. Es preciso investigar el modo de que los usuarios puedan determinar con certeza si un sitio de la Red es de fiar. ¿Cómo averiguar si se puede confiar en el material que emana de un sitio? En sus orígenes, la Red fue concebida como instrumento de comunicación entre investigadores que se tenían mutua confianza; no se integraron en ella modelos de seguridad robustos. Desde entonces venimos sufriendo las consecuencias.

En consecuencia, debería dedicarse un importante esfuerzo investigador para instaurar estratos de confianza y determinación de procedencias en las interacciones en la Red. La conjunción de nuestras personas físicas y digitales ofrece oportunidades para el progreso; sería el caso de la integración de los servicios médicos, financieros, sociales y educativos de cada uno. Pero es asimismo una oportunidad para la suplantación de identidades, para la emboscada cibernética y el abuso de poder, por no mencionar el espionaje digital. La ciencia de la Red puede contribuir a robustecer lo bueno y mejorar lo malo.

Antes de que se pueda aprovechar plenamente todo el rico potencial de la Red será preciso afrontar otras varias cuestiones. ¿En qué medida influyen las normas sociales en las capacidades emergentes? ¿De qué modo es posible implantar la protección de la privacidad, los derechos de propiedad intelectual o la seguridad? ¿Qué tendencias podrían fragmentar la Red?

Son muchos quienes ya trabajan en diversas facetas de estas cuestiones. La ciencia de la Red puede conjuntar tales esfuerzos y crear sinergias. Es necesario proporcionar formación en un amplio abanico de destrezas y materias a un núcleo de investigadores, desarrolladores, profesionales y usuarios. Podremos así comprender más plenamente la Red y descubrir la manera de trazar las directrices necesarias para el siglo XXI y posteriores.

Bibliografía complementaria

EXPLORING COMPLEX NETWORKS. Stephen H. Strogatz en *Nature*, vol. 410, págs. 268-276; 8 de marzo, 2001.

THE SEMANTIC WEB REVISITED. Nigel Shadbolt, Tim Berners-Lee y Wendy T. Hall en *IEEE Intelligent Systems*, vol. 21, n.º 3, págs. 96-101; mayo-junio, 2006.

CREATING A SCIENCE OF THE WEB. Tim Berners-Lee, Wendy T. Hall, James W. Hendler, Nigel Shadbolt y Daniel Weitzner en *Science*, vol. 313, págs. 769-771: 11 de agosto, 2006.

GOOGLE'S PAGERANK AND BEYOND: THE SCIENCE OF SEARCH ENGINE RANKINGS. Amy N. Langville y Carl D. Meyer. Princeton University Press, 2006.

WEB SCIENCE: AN INTERDISCIPLINARY APPROACH TO UNDERSTANDING THE WEB. James Hendler, Nigel Shadbolt, Wendy T. Hall, Tim Berners-Lee y Daniel Weitzner en *Communications of the ACM*, vol. 51, n.º 1, págs. 60-69; julio de 2008.

Partículas bellas de materia y antimateria

La física de partículas quizá conozca días de esplendor cuando funcione a pleno rendimiento en el CERN el acelerador más potente jamás construido. Mientras, el Tevatrón ha seguido comprobando la validez del modelo estándar y descubriendo nuevas partículas

Alberto Ruiz Jimeno

Cuando las partículas elementales interaccionan entre sí, no sólo se modifican algunas de sus características, sino que, en ocasiones, hasta su identidad fluctúa. Una partícula elemental puede trasmutarse, cambiar de nombre, de etiqueta, y recuperar su antigua naturaleza, en un proceso consecutivo de lapsos intermedios cortísimos, antes de desintegrarse en otras partículas. Esos cambios comportan unos efectos que los detectores de los aceleradores de partículas pueden distinguir. A punto de entrar en funcionamiento un acelerador de partículas que explorará nuevas energías, el más poderoso de los viejos colisionadores ha seguido midiendo tales cambios de identidad en regiones del modelo estándar de la física de partículas apenas exploradas por la experimentación.

El modelo estándar

Según el modelo estándar de la física de partículas, la materia se compone de quarks y leptones. Los quarks están sometidos a los cuatro tipos de interacción conocidos —electromagnética, débil, fuerte y gravitatoria—; los leptones, en cambio, no están sometidos a la interacción nuclear fuerte. En cualquier caso, la interacción electromagnética sólo afecta a las partículas que poseen carga eléctrica; la interacción gravitatoria, a las que poseen masa.

Hay seis tipos, o "sabores", de quarks, y otros tantos de leptones. Esos seis tipos se agrupan a su vez en tres familias o generaciones. La interacción débil convierte unos sabores en otros; la fuerte, liga los quarks para formar nucleones —es decir, los protones y neutrones de los núcleos atómicos. A partir de determinadas energías, las fuerzas electromagnética y débil se funden en una sola, la electrodébil, que a energías aún mayores debe fundirse con la interacción fuerte.

La ecuación cuántica relativista que gobierna el comportamiento de estas partículas es la ecuación de Dirac. Sus soluciones incluyen partículas de antimateria, que poseen la misma masa que las partículas correspondientes, pero tienen todas sus "cargas" internas, como la carga eléctrica, con el signo opuesto. Así, por cada tipo de quark existe un antiquark y por cada tipo de leptón un antileptón. Cuando una partícula y su correspondiente antipartícula se encuentran, se aniquilan mutuamente,

CONCEPTOS BASICOS

- Un dispositivo experimental instalado en el acelerador de partículas Tevatrón del Fermilab en Chicago, y conocido por CDF, ha observado nuevos bariones, constituidos por tres quarks, uno de ellos el quark *belleza*. Estas partículas pesadas sólo se han observado en el universo actual en las colisiones de los aceleradores de partículas.
- CDF ha comprobado la oscilación entre materia y antimateria de los mesones B_s.
- Los resultados confirman de nuevo la validez del modelo estándar de la física de partículas.

1. **EL LABORATORIO FERMILAB tiene un complejo de aceleradores de partículas. Los choques más energéticos suceden en el anillo que aquí se ve en segundo plano, el Tevatrón. Para alcanzar esas energías se requieren varias fases previas. A la izquierda, entre los dos anillos, se encuentran un preacelerador Cockcroft-Walton —un par de terminales a diferente potencial eléctrico—, que acelera hidrógeno ionizado negativamente hasta los 750 KeV, un acelerador lineal que lleva, mediante cavidades de radiofrecuencia, esos iones hasta 400 MeV, y un sincrotón circular donde los protones, ya sin electrones, eliminados por un filtro de carbono, alcanzan los 8 GeV. El anillo que se ve en primer plano es el Inyector Principal, donde las partículas adquieren, impulsadas también por cavidades de radiofrecuencia, energías de 150 GeV, y donde, mediante el bombardeo de un blanco de níquel, se generan los antiprotones. Estos y los protones chocan frontalmente en el Tevatrón, tras ser acelerados por cavidades y dirigidos por imanes dipolares, ambos superconductores, con energías, unos y otros, de un TeV.**

convirtiéndose en energía. Y viceversa: si hay una energía superior a la suma de las masas de partícula y antipartícula, puede convertirse en un par partícula-antipartícula.

Las partículas compuestas por quarks reciben el nombre de hadrones. Los hay de dos tipos: bariones, si están constituidos por tres quarks, o mesones, si constan de un quark y un antiquark. En concreto, los nucleones están constituidos por combinaciones del quark arriba (*u*) y el quark abajo (*d*), que pertenecen a la primera generación. Los quarks de las otras generaciones forman partículas que sólo observamos en los aceleradores de partículas o en las interacciones entre rayos cósmicos y atmósfera.

La dinámica de los hadrones viene determinada, esencialmente, por la interacción nuclear fuerte. Y así, los quarks constituyentes son en realidad los quarks de "valencia", en analogía con los electrones de valencia de los átomos (los que fijan sus propiedades químicas). Cada una de las cuatro interacciones fundamentales se halla ligada al intercambio de determinados tipos de partículas, pertenecientes a la clase de los bosones (mientras que quarks y leptones son fermiones). En el caso de la interacción fuerte, los quarks y antiquarks se intercambian las partículas denominadas gluones.

La dinámica expuesta nace de la existencia de una propiedad intrínseca de los quarks, el "color", que se intercambia en las reacciones de quarks y gluones. Los hadrones son, globalmente, neutros en cuanto al color (como los átomos son neutros en cuanto a la carga eléctrica). Es tan fuerte y característica la interacción, que los quarks quedan confinados en unas dimensiones espaciales inferiores al tamaño de los núcleos de los átomos: paradójicamente, los quarks casi son libres en el interior de los hadrones.



Laboratorios de partículas

El modelo estándar se concibió a mediados de los años sesenta. Desde entonces, ha sido verificado experimentalmente una y otra vez. Sus parámetros se han medido con extraordinaria precisión. Destacan los experimentos realizados durante la última década del siglo XX en el acelerador Gran Colisionador Electrón-Positrón (LEP) del Centro Europeo de Física de Partículas con sede en los aledaños de Ginebra (CERN), hoy ya clausurado, y en el Tevatrón del Fermilab en Chicago, aún en funcionamiento. El Gran Colisionador de Hadrones (LHC), del CERN, trabajará a energías mucho mayores que los aceleradores mencionados.

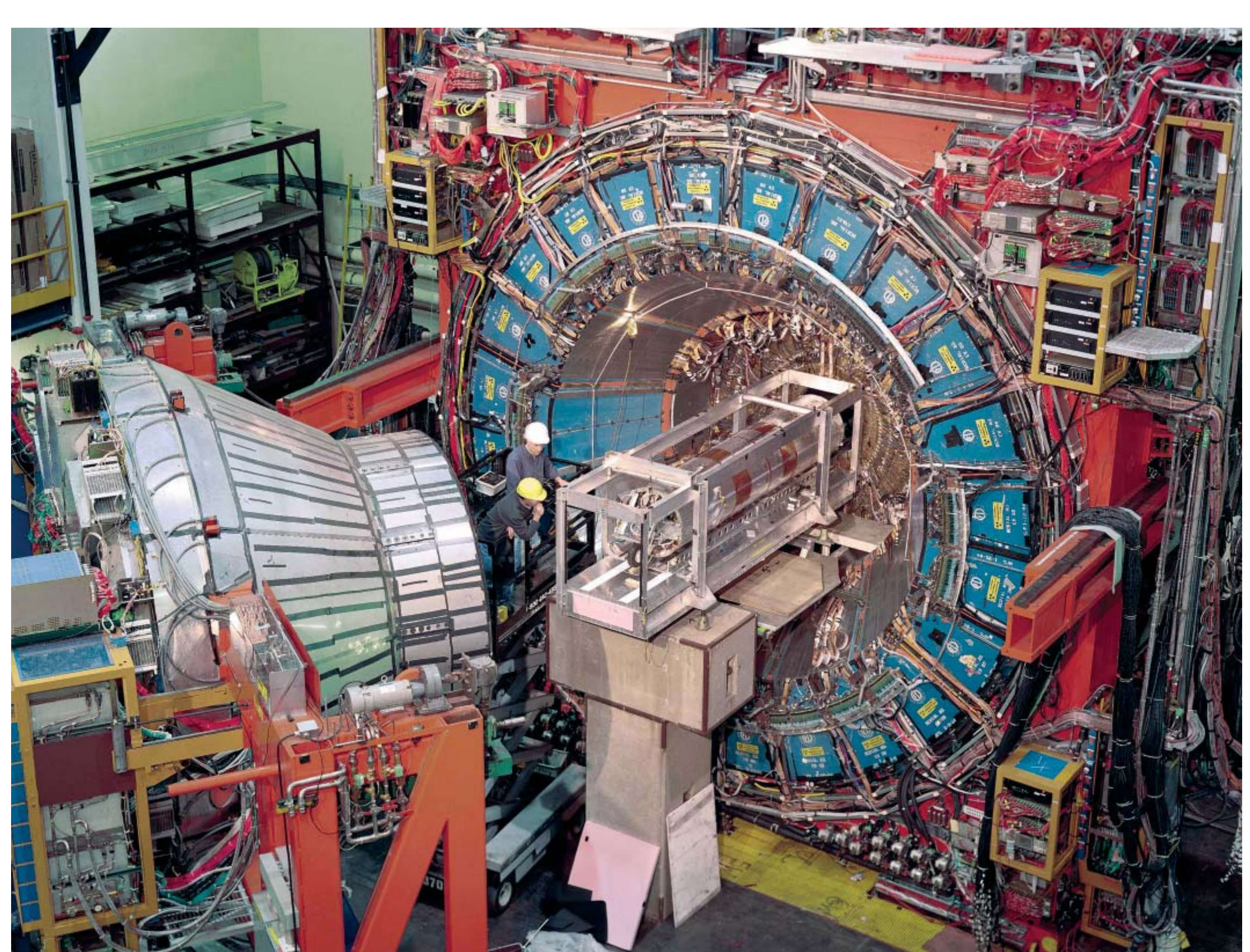
El Detector del Colisionador en el Fermilab, o dispositivo experimental CDF, es uno de los dos que operan en el Tevatrón. En este acelerador de protones y antiprotones circulan en dirección opuesta, a energías de casi 2 teraelectronvolt (1 teraelectronvolt, o TeV es, aproximadamente, mil veces la masa de un protón). El equipo científico del CDF (la "colaboración" CDF) consta de más de 600 físicos e ingenieros de unas 60 instituciones de todo el mundo, entre ellas tres instituciones españolas (el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT, de Madrid; el Instituto de Física de Altas Energías, IFAE, de la Universidad Autónoma de Barcelona, y el Instituto de Física de Cantabria, IFCA, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y de la Universidad de Cantabria).

Oscilación materia-antimateria

Una de las principales actividades de CDF está ligada a la observación del comportamiento de los hadrones cuya composición incluye un quark de valencia de tipo b (el quark b, "belleza", o "fondo", es el segundo quark más pesado; el primero es el quark t, "cima", descubierto por la colaboración CDF en 1995).

Los mesones B_s constan de un quark *s* y un antiquark *anti-b*, o $\overline{b}$. (El quark *s*, o extraño, es el menos pesado de la segunda generación de quarks.) En realidad, y debido a la interacción electrodébil, los mesones B_s poseen durante su corta vida una doble esencia. En cuanto las colisiones del CDF producen un B_s, éste evoluciona hacia un estado en el que participa a la vez de la esencia B_s y de la esencia de su antipartícula, el anti-B_s o $\overline{B}_s$ (mesón compuesto por un quark *b* y un antiquark *anti-s*). Y lo mismo ocurre cuando se produce un *anti-*B_s. Esta "sutil danza" entre materia y antimateria deriva de las leyes de la mecánica cuántica y del modelo estándar. Pero, tras poco más de una billonésima de segundo, el mesón se

2. El detector CDF.

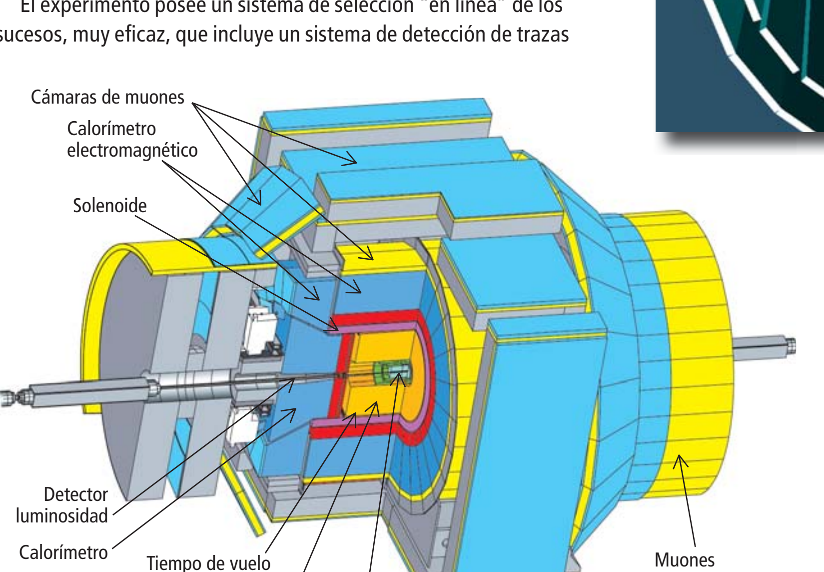


ALBERTO RUIZ JIMENO

CDF

Instalado en el acelerador de partículas Tevatrón del Fermilab, en Chicago, hay un dispositivo experimental de detección, conocido por CDF. Se trata de un sistema complejo. Consta de los elementos siguientes (arrancando del interior): un sistema de detección de vértices —los puntos de colisión donde convergen las partículas que chocan y de donde salen las partículas producidas en la colisión—, que utiliza semiconductores de silicio; una cámara de barrido para la reconstrucción de las trayectorias de las partículas y medición de su momento, que registra, además, la ionización de las partículas cargadas; un detector de tiempo de vuelo, para la identificación y medición de la masa; un solenoide superconductor de 5 metros de longitud, que provee de un campo magnético axial de 1,4 teslas; un calorímetro electromagnético, seguido de un calorímetro hadrónico, que miden la energía de las partículas que lo atraviesan; y un sistema de cámaras de muones, para la identificación de los mismos.

El experimento posee un sistema de selección "en línea" de los sucesos, muy eficaz, que incluye un sistema de detección de trazas



EN ESTA SIMULACION se observa un suceso que podría haberse producido en una de las colisiones protón-antiprotón en el experimento CDF. Las trayectorias de las partículas cargadas (*líneas verdes*) se obtienen mediante el ajuste de las señales (*trazas azules*) depositadas en las 8 "supercapas" concéntricas —capas de hilos sensores— del detector de reconstrucción de trazas. En el centro, en marrón, se muestra el detector de luminosidad.

desplazadas del punto de colisión que son características de los procesos de desintegración de hadrones con quark *b*. De este modo, mesones y bariones con contenido b pueden separarse, sobre la marcha, de los sucesos que sólo contienen quarks ligeros, tres órdenes de magnitud más frecuentes. El detector CDF viene a tener el tamaño de una casa de tres pisos y pesa alrededor de 6000 toneladas. Se ha instalado en una de las dos zonas de interacción de los haces de protones y antiprotones del acelerador Tevatrón, del laboratorio Fermilab, que es, hasta que realmente funcione el nuevo acelerador del CERN, el acelerador más potente del mundo.

desintegra ora en un B_s, ora en un *anti*-B_s. La probabilidad de que ocurra lo uno o lo otro viene dada por el estado en que se encuentre en ese momento la mezcla de ambas esencias. El modelo estándar predice que la probabilidad en cuestión oscila con el tiempo: su valor viene determinado por la regular fluctuación de un coseno, en concreto el del producto de un parámetro, que da la frecuencia de la oscilación, y el tiempo transcurrido entre la formación del mesón y su desintegración.

La primera predicción teórica de la existencia de oscilaciones en hadrones eléctricamente neutros —como el B_s— se remonta más de cincuenta años atrás. Murray Gell-Mann y Abraham Pais fueron sus autores. Las primeras propuestas experimentales con mesones ligeros, como los mesones *K*, o kaones, neutros, se debieron al propio Pais y a Oreste Piccioni, en 1955. Obtuvieron los primeros indicios de la existencia de oscilaciones en mesones neutros *K*. Landé y sus colaboradores en 1956, en el Cosmotrón del Laboratorio Nacional de Brookhaven, y la confirmaron definitivamente W. F. Fry y sus colaboradores en 1956, en el Bevatrón del Laboratorio Lawrence en Berkeley.

Posteriormente, en 1987, se observó un indicio de oscilaciones en los mesones B_d (la estructura *anti-b d*) en el experimento UA1 del

DETECTOR DEL COLISIONADOR EN EL FERMILAB (*arriba*); FERMILAB (*abajo*)

CERN. Muy pronto, lo confirmaron los experimentos ARGUS del laboratorio DESY, de Hamburgo, y CLEO, del laboratorio Cornell, cerca de Nueva York. En fecha reciente, han medido su frecuencia de oscilación, con una precisión del 1 %, los experimentos BaBar y Belle (respectivamente, en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford —SLAC—, en California, y en el laboratorio KEK, japonés).

Como los mesones B_s oscilan mucho más deprisa que los B_d, la determinación de su frecuencia de oscilación requiere medir el tiempo que tardan en desintegrarse con una precisión elevadísima. Por eso, no había sido posible conseguir con los B_s lo que se había logrado con los B_d. En los últimos veinte años, gracias a los experimentos del LEP, del SLC en el SLAC y del propio CDF, sólo habían podido obtenerse cotas inferiores de la frecuencia. Sin embargo, en 2005 y 2006 los experimentos CD0 y, con mayor precisión, del CDF lograron por fin medirla.

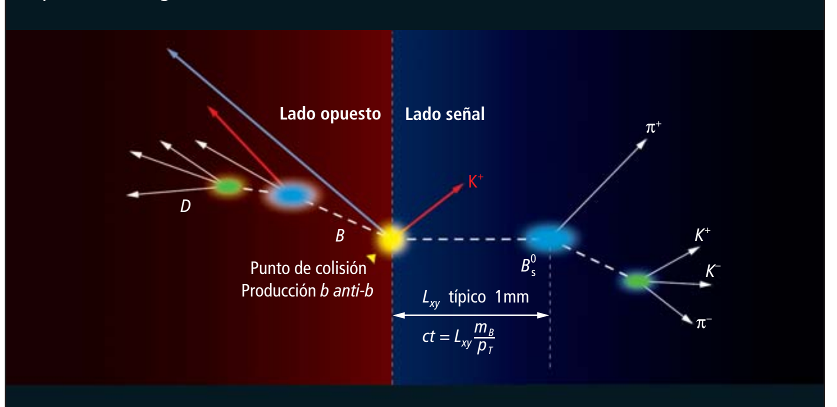
La selección, entre la gran cantidad de sucesos que se producen en CDF, tres órdenes de magnitud más copiosos que los episodios que producen mesones con belleza, constituye de suyo un reto formidable, que CDF resuelve a través de un procedimiento complejo. Un sistema "disparador determina sobre la marcha, a partir de una pequeña muestra de la información recogida por los instrumentos del experimento tras una colisión, si en ésta se ha creado un mesón B_s o *anti*-B_s. Merece, por tanto, la pena registrar toda la información relativa a esa colisión. Tal mesón es eléctricamente neutro: emerge invisible de su vértice de colisión, el punto donde confluyen el protón y el antiprotón que, con su colisión, lo originan.

El plazo medio de vida de los hadrones con un quark *b* o *anti-b*, aunque corto, es lo bastante largo para que puedan recorrer unos milímetros antes de desintegrarse en su vértice de desintegración, el punto donde aparecen las partículas cargadas, y por tanto visibles para los detectores eléctricos, en que el mesón se desintegra (kaones, piones). Difieren por eso del resto de los sucesos típicos de los choques de protones y antiprotones, en los cuales no existen, en la vecindad del vértice de colisión de los haces, vértices secundarios correspondientes a la desintegración de partículas de vida corta. Esa separación entre los dos vértices indica la producción del mesón B_s o de su antipartícula. El proceso es muy riguroso y se realiza mediante algoritmos que se valen de redes neuronales para separar sucesos de interés (señal) del resto (ruido).

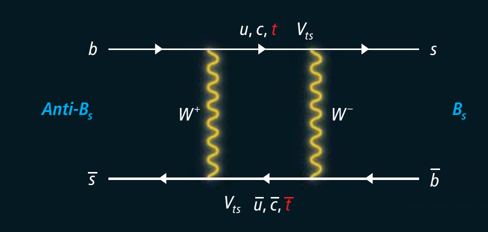
Además, la creación de un B_s o de un *anti*-B_s suele ir acompañada de la aparición de un kaón dotado de carga eléctrica. Lo registra el TOF, un detector de partículas cargadas. Su información se combina con otros datos. Por una parte, los tiempos que transcurren entre la producción de las partículas cargadas que acompañan al mesón B_s y su detección por TOF. Es decir, el tiempo desde que chocan los protones y antiprotones, hasta su llegada al TOF. Por otra, la medición de la ionización de esas mismas partículas en la cámara de reconstrucción de trazas. La combinación de ambas medidas permite determinar la masa de la partícula invisible que falta. Y sabiendo su masa, conocemos si se trata de un B_s, sea en versión de partícula o de antipartícula. El signo de la carga del kaón distingue entre ambas posibilidades.

B_S Y *anti*-B_S: ESENCIAS OSCILANTES

En una colisión de protones y antiprotones pueden producirse un quark *b* y un quark *anti-b*. No permanecerán, sin embargo, desnudos, sino que se "hadronizarán": cada uno de ellos quedará incluido en un hadrón. Uno de esos dos hadrones (el del "lado de la señal") puede ser un mesón B_s (formado por un quark *anti-b* y un quark *s*) o su antipartícula $\overline{B}_s$. En el ejemplo de la gráfica, se trata de un $\overline{B}_s$; el mesón del otro lado es un mesón *B*, formado por un *anti-b* y un quark *u* o un quark *d*. A causa de la interacción electrodébil, el $\overline{B}_s$ (o el B_s) compartirá durante su corta vida esa esencia original con la de B_s (o la de $\overline{B}_s$). En virtud de esa fuerza, los quarks *b* y *s* intercambian un bosón W^+, tras lo cual se transforman en un quark *t* y su antiquark *t*. Entonces, un intercambio de un W^- entre estas dos partículas genera un par *sb*. El diagrama de Feynman —representación gráfica de las interacciones— simboliza el proceso, que se atiene a una ley oscilatoria simple: ambas esencias se transmutan en la otra regularmente, hasta que se desintegran en otros hadrones.



La producción de un mesón B_s o de su antimesón suele ir acompañada de la emisión de un kaón, un tipo de mesón. El signo de su carga indicará si se ha producido un B_s o un $\overline{B}_s$. A una distancia de alrededor de un milímetro, se desintegrará ora como un B_s, ora como un $\overline{B}_s$. En la gráfica inferior se ilustra una de las formas en que tiene de desintegrarse como un B_s: emite un pion positivo, otro tipo de mesón ligero, con lo que se convierte en un mesón D^-, que se desintegra en un par de kaones y un pion.

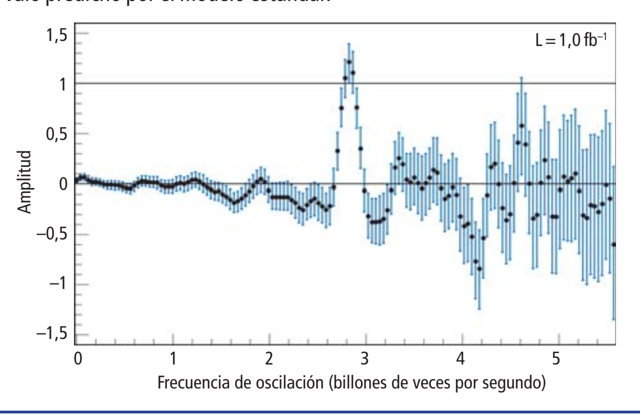


DETECTOR DEL COLISIONADOR EN EL FERMILAB

LAS OSCILACIONES DE LOS MESONES B_S, MEDIDAS

La frecuencia de oscilación entre mesones B_S y *anti-B_S* ha sido medida por el experimento CDF de Fermilab. Según el modelo estándar, la probabilidad de que un B_S se desintegre como un *anti-B_S* oscila a lo largo del tiempo con una frecuencia constante, de acuerdo con una simple función sinusoidal. Simplificando las cosas, puede decirse que el experimento mide esa probabilidad y el tiempo que transcurre entre la formación y la desintegración de los mesones, y así determina la frecuencia. (En realidad, cada mesón tarda un tiempo distinto en desintegrarse. Y, por otra parte, para establecer las probabilidades sólo se cuenta con una cantidad limitada de casos. Por tanto, para calcular la frecuencia de oscilación a partir de los datos hay que efectuar un ajuste complejo.) Siempre habrá un número, una "amplitud", tal que, multiplicando por dicha cifra la función sinusoidal, se cumpla, para los valores empíricamente obtenidos de la probabilidad y la frecuencia, la fórmula que liga ambas variables.

Los resultados del experimento son compatibles (dentro de los márgenes de error, representados por las rayas verticales) con una amplitud nula; es decir, compatibles con que no haya oscilación, sino una mera aleatoriedad en que los mesones se desintegran como ellos mismos o como sus antipartículas, excepto en un pequeño intervalo alrededor de una frecuencia cercana a 3 billones de oscilaciones por segundo. Ahí, los datos son compatibles con una amplitud igual a uno, como en la fórmula correspondiente a la hipótesis de la oscilación. Puede calcularse, además, que la probabilidad de que los resultados se deban a la aleatoriedad en vez de a la oscilación es de menos de uno en diez millones. Por tanto, cabe decir que el sistema CDF ha detectado las oscilaciones de los mesones B_S y que su frecuencia es de cerca de 3 billones de oscilaciones por segundo, valor que cae dentro del intervalo predicho por el modelo estándar.



Otros instrumentos establecen, a partir de los productos de desintegración, si el B_s o *anti-B_s* se ha desintegrado conforme a su naturaleza original o conforme a la naturaleza de su antipartícula. El sistema de reconstrucción de trazas de partículas cargadas y de vértices de producción y desintegración permite medir el tiempo de vida de los mesones B_s *o anti-B_s* con precisiones un orden de magnitud mejores que ese tiempo de vida.

Finalmente, un complejo método de ajuste nos faculta para determinar con gran precisión la frecuencia de oscilación y la probabilidad de que ésta corresponda a señales reales y no a una mera fluctuación estadística.

Los dos experimentos del Tevatrón, el propio CDF y el D0, anunciaron, a mediados de 2006, la posible existencia de oscilaciones en mesones B_s. La colaboración D0 declaraba que el mesón oscilaba con una frecuencia comprendida entre 2,7 y 3,3 billones de veces por segundo, con un nivel de confianza del 90 % (es decir, la probabilidad de que, para una muestra del tamaño de la medida en el experimento, la frecuencia real no caiga en un intervalo de ese tamaño alrededor del valor medio de la muestra es del 10 %). Por su lado, el CDF informaba de que la frecuencia de oscilación se situaba entre 2,7 y 2,8 billones de veces por segundo, con un nivel de confianza del 99,8 %.

De inmediato, la colaboración CDF comenzó un estudio sistemático mejorado, con un número mayor de canales (modos) de desintegración, una selección más eficaz de la señal y una criba optimizada del ruido de fondo. Además, se incluyó un procedimiento de análisis del sabor del quark en el punto de producción, que incluía tanto las observaciones en el lado opuesto a la producción de la señal como las del lado de la señal. Los mesones B_s o *anti-B_s* se crean al "hadronizarse" cada componente de un par quark *b*-quark *anti-b* —los quarks no pueden vivir solos— generado en la colisión del protón y el antiprotón; en concreto, cuando la hadronización consiste en la combinación con un quark extraño. Por lo tanto, además de un mesón o antimesón proyectado en una dirección se produce un hadrón proyectado en una dirección casi contraria. La redundancia de estudiar ambas partículas permitió una mayor capacidad de detección de este tipo de sucesos.

Un amplio equipo de investigadores del CDF, entre ellos algunos del Instituto de Física de Cantabria, emprendieron las tareas de análisis de este proceso que condujeron finalmente a la observación y medida precisa de las oscilaciones de mesones B_s o *anti-B_s*. Los resultados se publicaron en diciembre de 2006. El resultado observado, de 2,83 billones de veces por segundo, con un error inferior al 1 % y un nivel de confianza del 99,999992 %, era totalmente concordante con las predicciones del modelo estándar y contrarias a las de algunos modelos que amplían el estándar. Una vez más, por lo tanto, el modelo estándar quedaba confirmado por los resultados experimentales.

El autor

Alberto Ruiz Jimeno es catedrático de física atómica, molecular y nuclear y jefe del Grupo de Altas Energías del Instituto de Física de Cantabria (institución mixta del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y la Universidad de Cantabria). Es miembro de la colaboración CDF del acelerador Tevatrón de Fermilab (Chicago), donde ha participado en el descubrimiento y medida de las oscilaciones de los mesones B_S. Previamente fue miembro de la colaboración DELPHI del CERN y participa en el proyecto CMS para el nuevo colisionador LHC del CERN. Ha participado en numerosos artículos científicos de física experimental de partículas elementales.

DETECTOR DEL COLISIONADOR EN EL FERMILAB

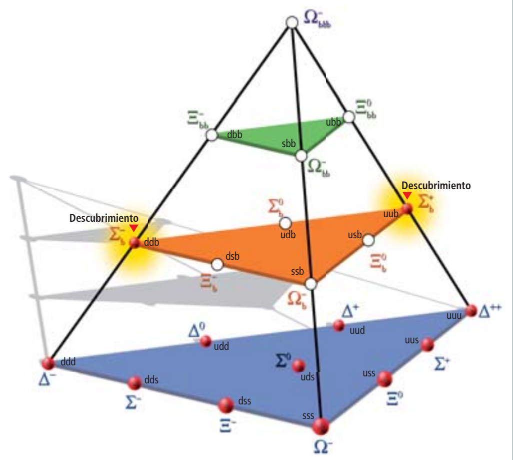
Nuevos bariones

Otra de las predicciones del modelo estándar basadas en la simetría de las interacciones fuertes es la existencia de nuevos bariones con quarks *b* en su estructura dinámica, denominados bariones sigma$_b$ (Σ_b) y csi$_b$ (Ξ_b). Los bariones Σ_b son "parientes" exóticos de los bariones que forman los núcleos atómicos, los nucleones. La constitución de aquéllos coincide con la de éstos, con una salvedad: en vez de un quark *d* tienen un quark *b*, cuando el pariente es el protón, o en vez de un quark *u* un quark *b*, cuando lo es el neutrón. Son unas seis veces más pesados que los nucleones y su vida media es muy corta, del orden de una billonésima de segundo. Los bariones Ξ_b se caracterizan porque están constituidos por quarks de las tres familias o generaciones. Su masa es algo superior a la de los mesones Σ_b.

Antes de la observación de estos bariones por el experimento CDF, sólo se había detectado un barión con contenido *b*, el lambda$_b{}^0$ ($\Lambda_b{}^0$). El experimento CDF buscó los nuevos bariones estudiando las partículas procedentes de su desintegración. La observación exigía un análisis muy fino de la masa invariante de los productos de desintegración, tras realizar un complejo filtrado que permitiera resaltar la "señal" entre varios cientos de billones de sucesos generados en las colisiones del Tevatrón. El resultado fue de unos cien bariones $\Sigma_b{}^+$ y otros tantos $\Sigma_b{}^-$, en cada caso en dos combinaciones posibles de espín —la propiedad cuántica ligada al magnetismo intrínseco de las partículas—, correspondientes al estado fundamental y un estado excitado. En cuanto a los bariones $\Xi_b{}^-$, también observados por el experimento D0, sólo se seleccionó una veintena.

El quark *b* es mucho más pesado que los otros dos que lo acompañan en esos bariones. Cierta aproximación, la "teoría efectiva de quarks pesados", representa el barión mediante un modelo en el que el quark pesado produce un campo estático de "color" rodeado por una "nube" constituida por los otros dos quarks ligeros. Las propiedades del barión vienen determinadas por la configuración de ese "diquark" ligero. El experimento CDF corrobora las predicciones del modelo; la observación de los nuevos bariones y la medición de su masa, con una precisión del orden del 0,05 %, ha supuesto un avance en el conocimiento de los mecanismos de interacción de los hadrones. Aún quedan muchos bariones, predichos por la teoría, sin descubrir. Los recién descubiertos rellenan otras casillas de la tabla clasificatoria de los bariones que se hallaban vacías también.

LOS BARIONES Y SUS QUARKS



FERMILAB

Los bariones constan de tres quarks, que a su vez pueden ser de seis tipos o sabores, llamados *u*, *d*, *s*, *c*, *b*, *t* (iniciales inglesas de "arriba", "abajo", "extraño", "encanto", "belleza" y "cima"). Debido a la simetría de la interacción nuclear fuerte, los bariones forman multipletes —grupos de bariones con una propiedad común, en este caso tener espín total 3/2—, como el de la figura. El espín es una propiedad cuántica de las partículas. Decir que una partícula tiene espín 1/2 o 3/2 significa que, al medirle esa magnitud en una dirección espacial concreta, el valor que se obtendrá será sólo uno de 2 o 4 posibles, respectivamente.

Los nucleones tienen espín 1/2 porque el espín de uno de los quarks de que constan tiene el espín orientado en un sentido distinto del de los otros dos. Los bariones delta (Δ) tienen la misma composición de quarks que los nucleones, pero los espines de los tres quarks apuntan en el mismo sentido, de ahí que el espín total sea 1/2 + 1/2 + 1/2 = = 3/2, como en los demás bariones representados en la gráfica. Esa configuración es más energética que la de los nucleones, lo que significa que los Δ pesan más que los nucleones. En esas simetrías, que encierran poder predictivo, se apoya su clasificación.

Los bariones de la figura que sólo se componen de quarks ligeros *u*, *d*, *s* han sido descubiertos ya. No así los formados por dos quarks ligeros y un quark *b*. El experimento CDF ha logrado identificar tres de ellos, dos de los cuales (los Σ_b) se encuentran tanto en el estado de espín total $J = 1/2$ (estado fundamental) como $J = 3/2$ (estado excitado, que es el que se muestra en la figura). El otro barión hallado ($\Xi_b{}^-$) es el primero observado que contiene quarks de las tres familias de quarks. Quedan por descubrir los bariones con dos quarks de tipo *b* y uno ligero, así como los que constan de tres quarks *b*. La teoría predice la existencia de muchos más bariones; entre ellos, aquellos en cuya estructura se encuentra también el quark *c*. Futuros análisis, con mayores muestras de sucesos, conducirán a la observación de nuevos bariones.

Los datos analizados en el experimento CDF para obtener estos resultados son menos de la mitad de los acumulados al día de hoy y una octava parte de los que se espera almacenar hasta el final de la toma de datos del experimento, en 2009. Con estas muestras mayores, se podrán descubrir nuevos bariones y medir sus propiedades, así como estudiar en mayor profundidad la diferencia de comportamiento entre materia y antimateria. El futuro dirá si los resultados se corresponden con las predicciones del modelo estándar o si hay indicios de nueva física. Si aconteciera lo segundo, ayudarán a definir cuál pueda ser la dirección a seguir a fin de continuar ahondando en la estructura íntima de la materia y de sus interacciones fundamentales. Los experimentos del nuevo acelerador LHC del CERN tomarán entonces el testigo en esta incesante carrera por descubrir los misterios de la naturaleza.

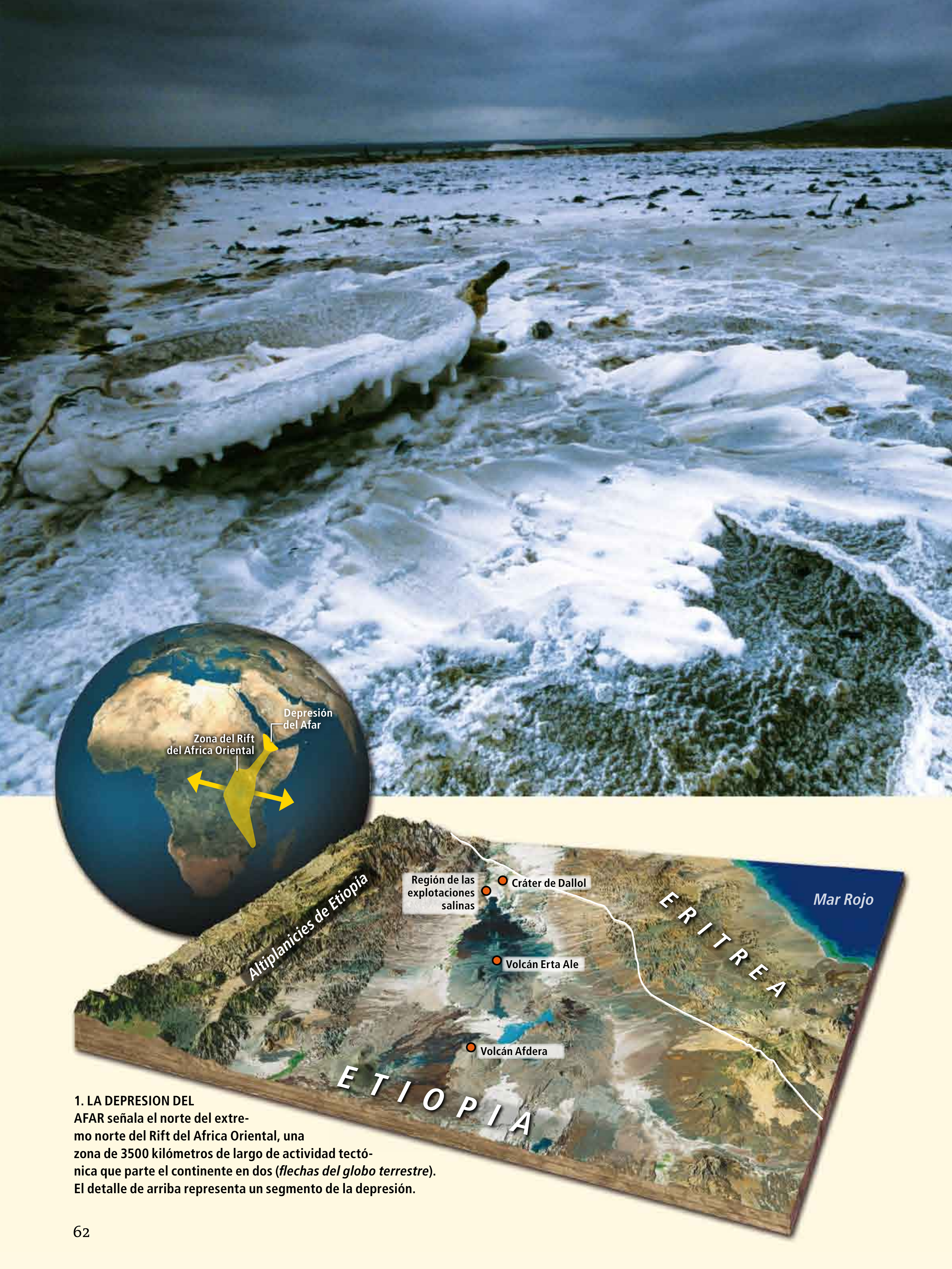
Bibliografía complementaria

EL TEVATRON. Leon M. Lederman en *Investigación y Ciencia*, mayo 1991.

ASIMETRIA ENTRE MATERIA Y ANTIMATERIA. Helen R. Quinn y M. S. Witherell en *Investigación y Ciencia*, diciembre 1998.

EL ORIGEN DE LA MATERIA. James M. Cline en *Investigación y Ciencia*, junio 2005.

FIRST OBSERVATION OF B_S-B_SBAR OSCILLATIONS FROM A TIME-DEPENDENT MEASUREMENT OF DELTA M_S. A. Abulencia y col. en *Physical Review Letters*, vol. 97, págs. 242003, 2006.



1. LA DEPRESION DEL AFAR señala el norte del extremo norte del Rift del Africa Oriental, una zona de 3500 kilómetros de largo de actividad tectónica que parte el continente en dos (*flechas del globo terrestre*). El detalle de arriba representa un segmento de la depresión.



2. **LOS FANTASMAGORICOS** depósitos salinos cercanos al volcán Afdera son el testimonio de antiguas inundaciones en la región etíope de Afar. En los últimos 200.000 años, el mar Rojo ha inundado las tierras bajas de Afar como mínimo tres veces; la sal permaneció tras la evaporación del agua del mar. Algún día, este sucedáneo de paisaje marino se convertirá en un verdadero mar.

El nacimiento de un océano

Eitan Haddok

La formación de una cuenca oceánica es un acontecimiento único. Está sucediendo hoy en uno de los rincones más calurosos e inhóspitos del mundo. Este extraordinario reportaje fotográfico nos ofrece la oportunidad de visitarlo

En el noreste de Etiopía, en uno de los desiertos más áridos del planeta, se está creando una nueva cuenca oceánica. La Depresión del Afar, así se conoce en geología esa región del continente africano, se está desgarrando. El proceso está adelgazando la capa rocosa más externa de la Tierra: la corteza continental tiene bajo el Afar sólo 20 kilómetros de espesor, menos de la mitad de su grosor original; algunos lugares se encuentran a más de 100 metros bajo el nivel del mar. Las colinas someras constituyen la única barrera que impide la invasión del mar Rojo.

Esa cercanía al abrasador interior del planeta ha transformado la región en un paisaje dinámico, trabajado por terremotos, volcanes y campos hidrotermales. Afar es, pues, un auténtico paraíso para quienes ansían, como el autor, comprender estos fenómenos. Sin embargo, pocos viajeros, pocos científicos incluso, han puesto un pie en Afar. Las temperaturas diarias alcanzan los 48 grados centígrados en verano, y entre lluvia y lluvia puede pasar más de un año. Sin embargo, ya sabía que encontraría algo más que una geología y un clima peligrosos. Las terribles luchas geopolíticas —la guerra entre Etiopía y Eritrea—, combinadas con las durísimas condiciones naturales, hacen de Afar un lugar absolutamente inhóspito.

La geología predice otro millón de años de adelgazamiento y hundimiento de la corteza. Con una enorme inundación por parte del mar Rojo, convertirán el Afar en el fondo de un nuevo océano. Por ahora, este incipiente fondo oceánico es un paisaje desolado donde la lava sofoca la vegetación, el calor infernal hace hervir el ácido, formaciones diabólicas emiten humos tóxicos y el legado salino de antiguas inundaciones del mar Rojo proporciona a las tribus nómadas de Afar una mercancía preciosa.

CONCEPTOS BASICOS

- Africa está, literalmente, partiéndose en dos. Desde el extremo sur del mar Rojo, pasando por Eritrea, Etiopía, Kenia, Tanzania y Mozambique, el continente se divide a lo largo del Rift del Africa Oriental.
- Como una camiseta que un bíceps abultado desgarrase, la corteza se raja y separa cuando roca fundida procedente de las profundidades empuja hacia arriba la superficie sólida y la estira y hace más delgada, a veces hasta el punto de rotura. Toda nueva hendidura se ensancha a medida que la lava rellena desde abajo el hueco.
- Este espectacular proceso geológico, que viene operando desde hace millones de años, se completará cuando el agua salada del Mar Rojo invada la enorme fractura. De aquí a 10 millones de años, todo el Rift podría quedar sumergido.

KEVIN HAND (*mapas*); FOTOGRAFIAS DE EITAN HADDOK



ASCENDIENDO

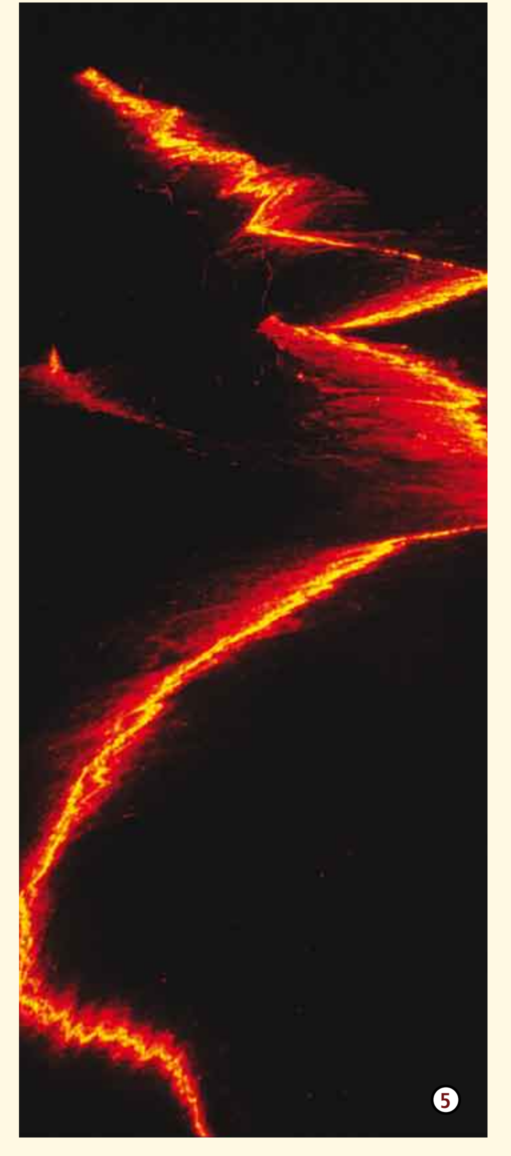
El punto más alto de la Depresión del Afar es el Erta Ale, o "la montaña humeante" en la lengua del lugar. El Erta Ale es el volcán más septentrional de una larga cadena dispuesta a lo largo del Rift del Africa Oriental. Este rift, o falla, es el equivalente sin sumergir de las dorsales mesooceánicas, cadenas de volcanes submarinos que producen litosfera oceánica. El Erta Ale arroja el mismo tipo de lava basáltica que emana de las dorsales mesooceánicas; las erupciones anteriores cubrieron la llanura circundante con tanto basalto, que a la vegetación le cuesta arraigar (1).

LAGO DE LAVA

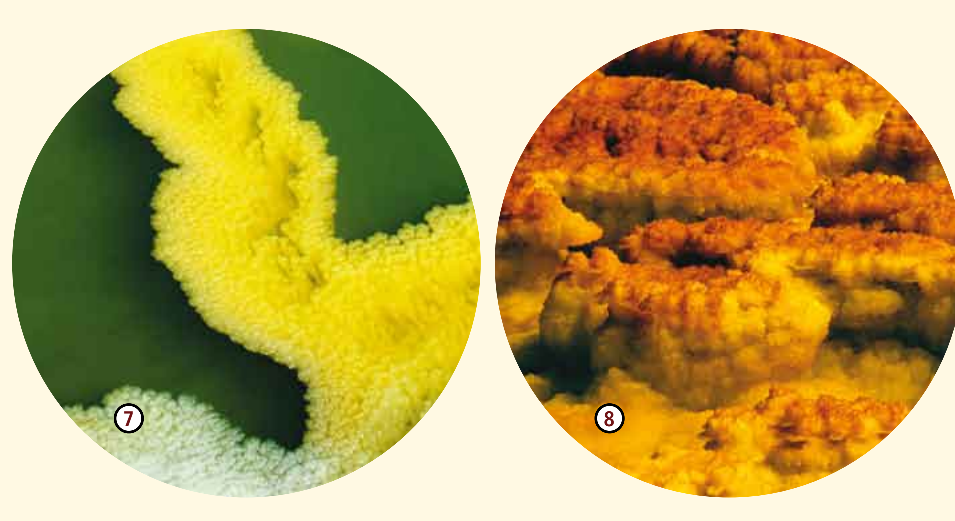
En la cima del Erta Ale se halla uno de los escasos lagos de lava casi permanentes del planeta. El flujo de calor procedente del interior de la Tierra rara vez basta para mantener fundida la roca cuando la atmósfera la enfría. A veces, hasta la temperatura del Erta Ale disminuye lo bastante para que algunos sectores de la superficie del lago "se congelen"; se forma entonces una corteza negra (2). En condiciones normales, los bloques de basalto flotan como icebergs en la abrasadora y fluida roca, que alcanza los 1200 grados centígrados (3). Los habitantes de Afar no se acercan al volcán porque existe la creencia de que esconde espíritus diabólicos. Es poco habitual ver a un guerrero del Afar en la cima del volcán; este hombre, Ibrahim, era mi guía (4). La lava manando por las fisuras del lago resulta especialmente espectacular por la noche (5). La vista evoca entonces los fantasmas de la tradición local.













CALOR INFERNAL

A 100 kilómetros al norte de Erta Ale, cerca de la frontera con Eritrea, se encuentra el cráter de Dallol. El magma fundido que hierve lentamente bajo la superficie calienta una amplia red de conductos de agua sobrecalentada. Se crea así un sector, de 1,6 kilómetros de extensión, con géiseres, cráteres y fuentes hidrotermales (6) que recuerda al Parque Nacional de Yellowstone, al oeste de los Estados Unidos, mucho más accesible. El mineral de azufre produce el amarillo limón de esta rocosa paleta (7); al mezclarse con el rojo característico del hierro oxidado, su tinte se vuelve naranja (8). Sólo unos pasos más allá de esta vívida escena se encuentra el recordatorio, seco y pardo, de cuán efímero es un paisaje de fuentes termales (9). Cuando un terremoto o cualquier otro proceso obstruye los conductos subterráneos de una solfatara, sus minerales pueden perder su colorista flujo en un año.

HUMOS LETALES

El paisaje surrealista del cráter de Dallol es el resultado de la percolación de la lluvia en las profundidades del subsuelo, donde se calienta en contacto con el magma ardiente, tras lo cual asciende hasta la superficie a través de gruesas capas de sal, que disuelve en su camino. La recristalización de la sal a la altura del suelo puede esculpir estructuras enormes (10) o formaciones tan frágiles como una cáscara de huevo (11). Sin embargo, la belleza de las esculturas puede ser traidora: vapores tóxicos que emanan de estas bocas de aireación son una contribución más a la diabólica reputación del Afar; a menudo, los visitantes se ven obligados a protegerse con máscaras de gas. En más de una ocasión, una ráfaga de este siniestro gas me forzó a dejar de tomar fotografías y ponerme la máscara.







¿VENENO O ELIXIR?

Cerca de las charcas rojizas de agua hirviente y rica en hierro (12), el fuerte olor de los hidrocarburos es una señal reveladora de peligro. En alguna ocasión, los animales se paran a beber, sin saber que será la última vez. Pude ver varios pájaros moribundos en las abrasadoras charcas. Sin embargo, me consolaba que el veneno de un organismo sea elixir para otro. Las mismas emisiones que pueden matar aves, insectos y mamíferos, también alimentan complejas comunidades de microorganismos, que medran en muchas de las ácidas aguas del Dallol. Estas comunidades termales terrestres mantienen parecido estrecho con las submarinas que viven a lo largo de las dorsales mesooceánicas.



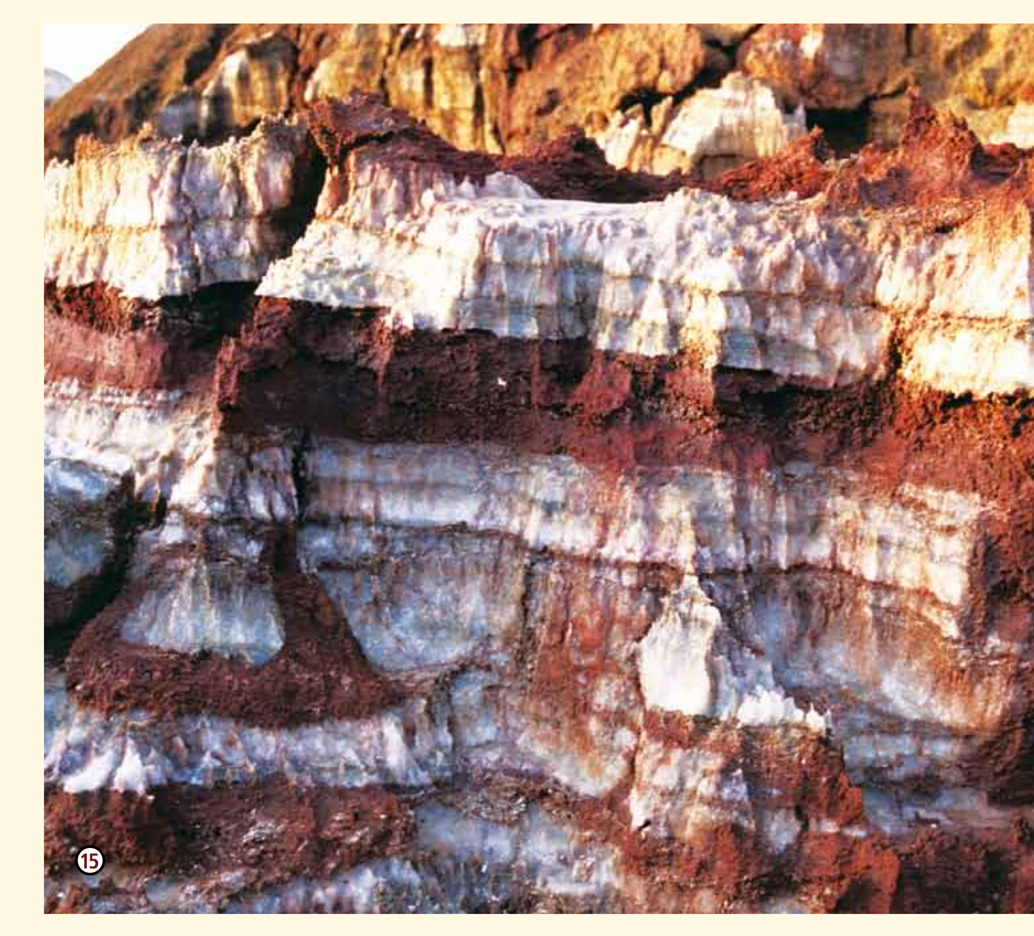


El autor

Eitan Haddok es fotógrafo y reportero especializado en ciencias de la Tierra y ambientales, sobre todo ecosistemas áridos. Obtuvo un máster en geofísica y ciencias planetarias en la Universidad de Tel Aviv en 1994. Con anterioridad, y durante nueve años, había trabajado como ingeniero ambiental, hasta que decidió unir sus dos pasiones —la Tierra y la fotografía— y convertirlas en un medio de vida.

FATIDICAS INUNDACIONES

Las esculturas de sal de la página anterior y otras que decoran el Afar sirven para recordar que el nacimiento de un océano no es un acontecimiento único, sino una historia en desarrollo. A lo largo de 30 millones de años, el grosor de esta región ha disminuido, el nivel global del mar ha fluctuado y a veces ha invadido el Afar. Hace unos 80.000 años, las aguas del Mar Rojo ascendieron tanto, que atravesaron las bajas colinas del este de Afar, donde excavaron profundos cañones (13) a medida que inundaban las tierras más bajas. Cuando el nivel del mar descendió y el Afar quedó nuevamente aislado del mar, las aguas se evaporaron. Durante los miles de años siguientes, el viento y el agua esculpieron los restos de estas antiguas inundaciones. Las estrambóticas formaciones a las que llaman setas de sal (14) aparecieron de ese modo. En otras áreas, se observan capas alternas de sal y sedimentos marinos rojizos en las paredes erosionadas de los cañones (15).



LA SAL DE LA TIERRA

Los restos salinos de inundaciones pasadas proporcionan a los habitantes actuales de Afar un modesto medio de sacar algún provecho de su tierra tostada y estéril. Los nómadas recogen la sal a mano; parten las gruesas capas en bloques manejables con estacas y machetes (16). Los lugares más cercanos donde vender o intercambiar la sal se hallan al oeste, en las altiplanicies etíopes, a unos seis días de viaje de las caravanas de camellos, transporte empleado para esta insólita exportación (17).



¿ESPEJISMO O ALUCINACION?

La mayoría de los años, la preocupación dominante entre las gentes de Afar es encontrar agua. Sin embargo, las lluvias de finales de 2006 fueron anormalmente fuertes y los campos de sal permanecieron inundados durante mi estancia en enero de 2007. Debo a esta circunstancia poco corriente una de las impresiones más duraderas de mi visita a Afar: a medida que las caravanas de camellos atravesaban la inundación, aparecían en la distancia como un montaje surrealista del presente y el futuro de esta cuenca oceánica en formación (18).



Bibliografía complementaria

MAGMA-MAINTAINED RIFT SEGMENTATION AT CONTINENTAL RUPTURE IN THE 2005 AFAR DYKING EPISODE. Tim J. Wright et al. en *Nature*, vol. 442, págs. 291-294; 20 de julio, 2006.

THE VOLCANO-SEISMIC CRISIS IN AFAR, ETHIOPIA, STARTING SEPTEMBER 2005. A. Ayele, E. Jacques, M. Kassim, T. Kidane, A. Omar, S. Tait, A. Nercessian, J.-B. de Chabalier y G. King en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 255, n.os 1-2, págs. 177-187; 15 de marzo, 2007.

Nuevas PROTESIS SIN PATENTE

Grupos de ingenieros, diseñadores e innovadores colaboran en línea para conseguir mejores prótesis de manos y brazos en los amputados. Uno de los participantes perdió su propio brazo en Irak

Sam Boykin

CONCEPTOS BASICOS

- Gracias al progreso de la medicina de emergencia, de la guerra regresan a casa con heridas muy graves muchos soldados que, en otras circunstancias, habrían fallecido.
- Las innovaciones en las prótesis de brazos y manos han sido lentas porque el mercado de esos aparatos es reducido y los costos del desarrollo elevados.
- El Open Prosthetics Project ha aplicado el modelo de "fuentes abiertas" —hace tiempo empleado en el desarrollo de programas de ordenador "basado en la comunidad"— al diseño de manos y brazos protésicos baratos que resulten viables, pese a la parvedad de la demanda. Los diseños son de libre uso para todos.

Antes de que enviaran a Jonathan Kuniholm, reservista de la infantería naval, a la guerra de Irak, había formado con tres amigos una empresa de investigación y desarrollo a la que llamaron Tackle Design. Los cuatro habían trabajado juntos en una clase de ingeniería industrial en la Universidad estatal de Carolina del Norte y, pletóricos de entusiasmo juvenil, confiaban en que su recién nacida empresa pudiera sobrevivir gracias a proyectos interesantes y benéficos, prescindiendo del lucro. Colaboraron con inventores —en los prototipos de un cierre de plástico para mantener atados los cordones de zapato y un cebo de pesca con un diodo luminoso incorporado— y con ingenieros médicos de su alma máter, que estaban desarrollando herramientas de cirugía robótica mínimamente invasiva.

Entonces, antes de que el negocio empezase a despegar, Kuniholm fue movilizado. Meses después, el día de Año Nuevo de 2005, él y otros 35 marines sufrieron una emboscada junto a la presa de Haditah, en el río Eufrates, al noroeste de Bagdad. Su sección había estado buscando unos insurgentes que, pocas horas antes, habían disparado sobre una lancha rápida que patrullaba por el embalse. Cuando los soldados se acercaban al que se sospechaba era el punto crítico, estalló un AEI —Artefacto Explosivo Improvisado— escondido en una lata de aceite de oliva. La sección fue barrida por la metralla y Kuniholm saltó por los aires. Momentos después, cuando recuperó el sentido, descubrió que su fusil M16 había reventado y que el brazo lo tenía destrozado hasta la altura del codo. Bajo un violento fuego, Kuniholm pudo apartarse para ponerse a salvo. Sus camaradas pidieron su evacuación por aire, y pronto los cirujanos de un hospital cercano a Bagdad le amputaban el brazo.

Tras su retorno a Carolina del Norte, Kuniholm sufrió múltiples intervenciones quirúrgicas en el Centro Médico de la Universidad Duke. Luego, tras la convalecencia, visitó el Hospital Militar Walter Reed, en Washington, D.C., donde los médicos le proveyeron de dos tipos de recambios artificiales de la mano y el antebrazo. Uno era un dispositivo convencional de pinzas, dos ganchos enfrentados, que el usuario puede separar o acercar mediante un sistema de cables y correas accionado por el hombro o el brazo (*se ve en la fotografía del recuadro* "Se necesitan nuevas prótesis de brazos"). El segundo era una prótesis "mioeléctrica", más avanzada, que capta las señales nerviosas producidas por la más mínima tensión muscular y transforma esas señales en movimiento. Los músculos de lo que queda de brazo hace que las pinzas de la "mano"

THE OPEN PROSTHETICS PROJECT (*garra Trautman*)

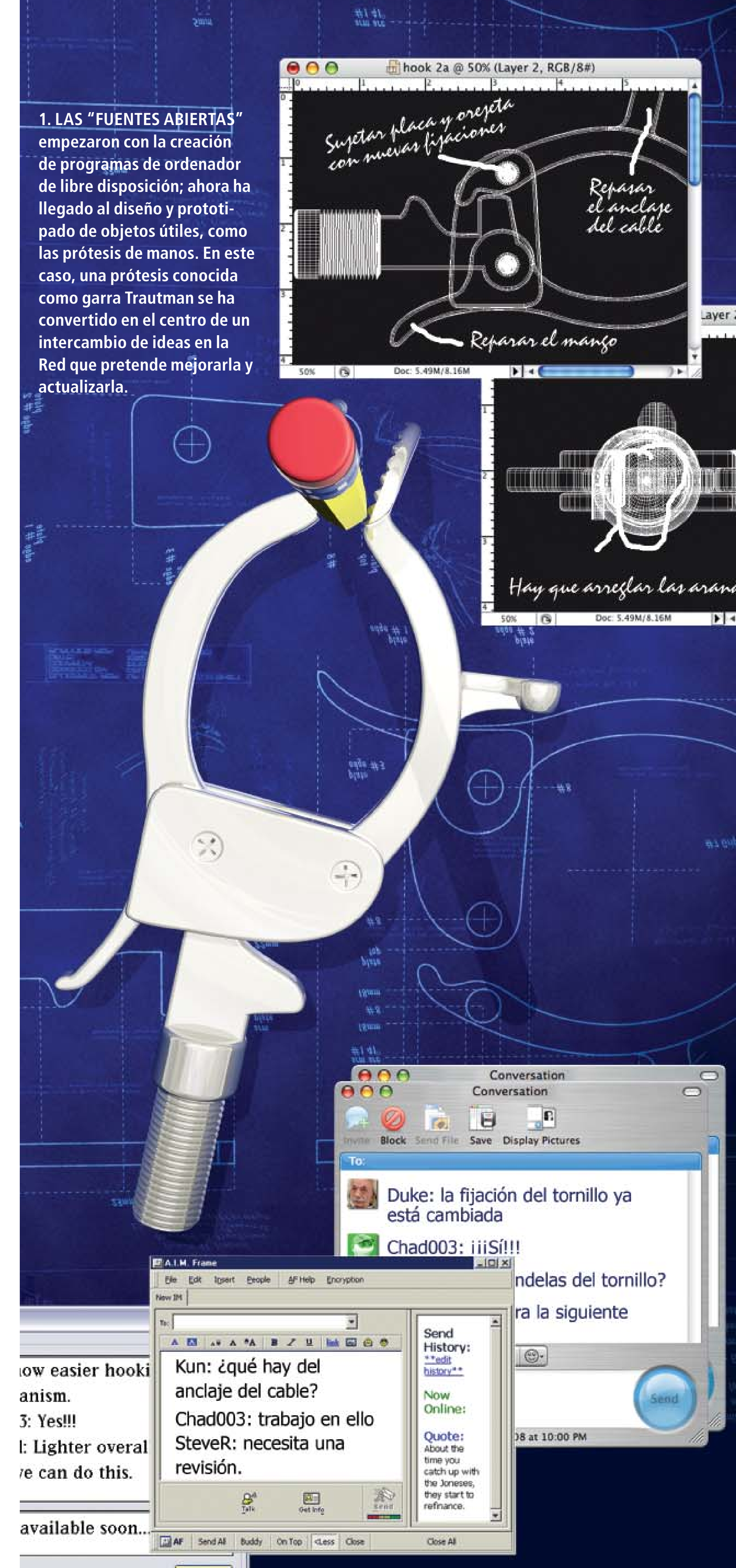
protésica se cierren; al relajarse los músculos, las pinzas se aflojan.

Las dos prótesis del Walter Reed eran de la última hornada de diseño protésico. Pero, de vuelta en Carolina del Norte, Kuniholm y sus socios de Tackle Design se quedaron impresionados por la falta de innovaciones en prótesis de manos y brazos. Estaban seguros de que podían hacer cosas mejores. Y de ese modo la pequeña empresa de diseño de Carolina del Norte entró en el campo de la prótesis. Más aún, Kuniholm y sus socios han creado en la Red una lonja para el intercambio de información sobre diseños protésicos; lo llaman Open Prosthetics Project (OPP), el Proyecto Abierto para Prótesis, cuyo propósito es fomentar ideas aptas para la innovación y luego poner los diseños a disposición de todos. No persiguen sólo beneficiar a personas como Kuniholm, que ya disponen de los recursos inherentes a una economía del primer mundo, sino a los amputados de todo el mundo.

La innovación, estancada

Aunque resulte paradójico, una de las razones por las que un grupo como el OPP puede recabar el interés público es el elevado coste humano de las guerras de Irak y Afganistán. Gracias a los formidables avances de la medicina de emergencia y a protecciones tales como los chalecos de Kevlar, en los combates se dan unas tasas de letalidad entre los soldados heridos muy inferiores a las de guerras anteriores. Este es el lado bueno. El lado malo es que muchos veteranos con heridas que en el pasado los habrían matado hoy regresan a casa con lesiones terribles.

Aun así, el número de amputados de las extremidades superiores es reducido y cuesta abrir brecha en el mercado protésico. Cuando Kuniholm y sus socios hicieron sus investigaciones sobre éste, les fue evidente que la causa principal de la falta de innovaciones era la carencia de incentivos financieros. Según la Coalición Norteamericana de Amputados, 1,7 millones de estadounidenses han perdido un miembro a causa de una enfermedad o un trauma, pero pocos de ellos necesitan un brazo o una mano de recambio. Un amputado típico tiene más de 50 años y ha perdido una pierna o un pie por diabetes u otra enfermedad. Los amputados de una extremidad superior —los que han perdido un brazo o una mano— se cifran en unas 100.000 personas, alrededor del 6 por ciento del total. Aún menos son los veteranos heridos. A finales de 2007 había unos 700 veteranos de las guerras de Irak y Afganistán con amputaciones, y de éstos unos 150 han perdido una mano o un brazo (o, en algunos casos, ambos brazos).



1. LAS "FUENTES ABIERTAS" empezaron con la creación de programas de ordenador de libre disposición; ahora ha llegado al diseño y prototipado de objetos útiles, como las prótesis de manos. En este caso, una prótesis conocida como garra Trautman se ha convertido en el centro de un intercambio de ideas en la Red que pretende mejorarla y actualizarla.

SLIM FILMS

LOS BRAZOS QUE HACEN FALTA

- **150** veteranos de las guerras de Irak y Afganistán habían perdido brazos o manos para finales de 2007.
- **100.000** amputados de miembros superiores viven en EE.UU.
- **650.000** amputados de miembros superiores en todo el mundo; la mayoría de quienes se encuentran en el mundo en vías de desarrollo carecen de una prótesis de brazo o de mano.



JONATHAN KUNIHOLM, ingeniero y doctorando de ingeniería biomédica en la Universidad de Duke, ha organizado el Open Prosthetics Project para mejorar los brazos y manos artificiales. Kuniholm cuenta con su propia experiencia, pues perdió parte del brazo derecho en la guerra de Irak.

ANDREW SYNOWIEZ *synster.com*

GARRAS Y ALTA TECNOLOGIA

Los brazos y las manos artificiales exhiben unos movimientos casi humanos, aunque, diga lo que diga la prensa, aún no están disponibles unidades controladas mentalmente. Para muchos pacientes, sin embargo, los mecanismos de alta tecnología siguen siendo demasiado lentos, pesados, costosos, frágiles y de control excesivamente arduo para que resulten prácticos.

- **Los brazos artificiales controlados con los nervios (mioeléctricos), hace tiempo en el mercado, transforman en movimientos las señales nerviosas procedentes de las contracciones musculares dentro del muñón.**
- **Prototipos avanzados de manos y brazos construidos por Dean L. Kamen, de DEKA Research and Development Corporation, y por la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada para la Defensa (DARPA) pueden agarrar un lápiz, rascar la nariz o verter agua en un vaso.**

Un mercado no muy amplio, y el consiguiente estrecho margen de beneficios, no hace rentable para las empresas invertir en investigación y desarrollo de prótesis de miembros superiores. "El protésico es uno de los muchos mercados mal servidos donde la innovación se ha estancado por falta de los incentivos tradicionales", dice Kuniholm. "En este campo, los que aportan innovaciones suelen ser usuarios apasionados que trastean en sus garajes."

Kuniholm piensa en los "usarios adelantados", como los llama Eric von Hippel, que se destacan de casi todos los demás, e incluso de otras empresas, en lo que se refiere a una tendencia importante del mercado. Un usuario adelantado espera, además, cosechar grandes provechos y beneficios de la tendencia. Según Von Hippel, profesor y director del Grupo de Innovación y Empresariado de la Escuela Sloan de Dirección de Empresas del Instituto de Tecnología de Massachusetts, los usuarios adelantados propenden a ser innovadores activos. Kuniholm apuesta por incorporar las ideas y opiniones de los usuarios adelantados a los nuevos productos, pues así éstos tendrán mejores oportunidades de hacerse con el mercado, ya que se anticipan a las necesidades de los consumidores.

Pero registrar una patente y conseguir un fabricante resulta costoso y enrevesado, por lo que la mayoría de los amputados que intentan mejorar algún diseño protésico nunca ven sus ideas ir más allá del taller. "Todas esas ideas e innovaciones se esfuman en el aire", añade Kuniholm.

El sitio www.openprosthetics.org, que forma parte de una organización denominada Shared Design Alliance, la Alianza para Diseños Compartidos, invita a los usuarios de prótesis, a los ingenieros y a quienes interese el tema a unirse a un intercambio de pareceres, convocado bajo la rúbrica de *Pimp My Arm*. (El nombre parodia al de la serie de la MTV *Pimp My Ride*, que representa a unos mecánicos de automóviles que reparan y personalizan viejos cacharros.) Los participantes pueden aportar tiempo, ideas e imaginación acerca de la mejora de los artefactos. Todas las ideas son de "fuente abierta", es decir, no hay patente de nadie y queda entendido que las ideas se comparten sin ningún límite.

Una solución sencilla

La principal contribución personal de Kuniholm al OPP es el perfeccionamiento en curso de la prótesis de gancho Trautman (*véase recuadro* "Un clásico puesto al día"). Este mecanismo, que apareció en 1925, es una prótesis de "apertura voluntaria". Significa que las pinzas se mantienen cerradas mediante bandas de caucho internas; cuando el usuario desea abrir la garra, mueve o encoge el hombro, que está acoplado a un sistema de correas y cables. No sólo parece tosco y elemental; lo es. Como la mayoría de las demás prótesis de gancho en el mercado, el modelo Trautman ha cambiado muy poco con el tiempo. "Muchos fabricantes de prótesis obedecen al mismo principio económico, 'una misma talla que valga para la mayoría', que los artículos de consumo masivo", dice Kuniholm. Pero, añade, con las prótesis "las necesidades y aptitudes de cada persona son únicas".

Aunque puede que los ganchos no resulten estéticamente gratos, ni quepa duda alguna de su primitivismo técnico, por lo general son más funcionales y duraderos, y mucho más baratos, que los dispositivos mioeléctricos (los ganchos cuestan, por término medio, entre 400 y 1500 euros, mientras que las manos mioeléctricas empiezan en los 4000). Además, la prótesis Trautman se singulariza por hacer uso del llamado contra-cierre: como las tenazas que antaño se usaban para transportar bloques de hielo, que convertían el peso del bloque en la misma fuerza que lo sujetaba por los costados, las pinzas de la prótesis se cierran u oprimen más contra un objeto cuando el usuario tira hacia atrás de ella con más fuerza. Otra ventaja es que las pinzas poseen unos dentados que se imbrican entre ellos, lo que hace aún más fuerte el agarre.

"Hay muchas opciones para los mecanismos protésicos, pero ninguna con la capacidad de ésta", dice Agnes A. Curran, especialista en prótesis de miembros superiores y directora clínica del Grupo Ortésico y Protésico de América. "En mis viajes encuentro pacientes de todo el país que han utilizado la prótesis Trautman y un mecanismo moderno ni lo mirarían. Los suyos los mantienen en-

teros mediante soldaduras, alambres y cinta aislante.”

Por sus características únicas y la robustez de su diseño, la garra Trautman suscitó una adhesión entusiasta, especialmente entre los agricultores y los rancheros del Medio Oeste. Pero el fabricante, la Paul Trautman Company, cesó en su actividad en los noventa; poco después de la desaparición de la empresa, apenas persistía, en el mercado residual, un limitado número de unidades. Cuando Kenneth M. Heide, protésico de Fargo (Dakota del Norte), tuvo noticia del OPP, vio en éste una perfecta oportunidad de devolver al mercado tan singular mecanismo. Con la aprobación de Trautman Company, Heide puso a disposición del OPP dos antiguas prótesis Trautman, que le habían prestado sus pacientes, y dos dispositivos nuevos que le facilitó Steven Stolberg, instructor del Century College, de White Bear (Minnesota), que los empleaba en sus clases. Tackle Design las sometió a ingeniería inversa. Creó así un modelo digital en un programa de diseño por ordenador; podría servir como punto de partida para introducir mejoras.

Para el primer lote, Kuniholm y sus socios no se complicaron la vida. Todo lo que hicieron fue reforzar las garras usadas por donde se habían roto y reparado con soldadura. Por correo electrónico enviaron las especificaciones de una de las garras a Anvil Prototype & Design, de Charlotte (Carolina del Norte), que sometió los diseños digitales a un proceso conocido como “prototipado rápido”. Anvil transformó la información digital en especificaciones para una “impresora tridimensional”, que construiría un primer modelo de la idea básica mediante millares de capas finas de materiales pulverulentos y aglomerantes que añadiría o “imprimiría” de una en una. El prototipado rápido posibilita afinar rápidamente el diseño. Seguidamente, Rapid Tool, de Boulder (Colorado), hizo cuatro modelos de prueba con polvo de acero inoxidable infundido de bronce que se añadía también capa a capa, se calentaba y se fundía. Tackle Design entregó gratis las nuevas garras mejoradas a pacientes para que las probaran durante un tiempo.

Pruebas, pruebas

Uno de aquellos pacientes fue L. Guy Davis, de 57 años, presidente de una empresa de tratamiento de aguas de Saint Peter (Minnesota), que en 1972 perdió el brazo derecho en un accidente de moto. Aunque Davis ya había pensado en ponerse un brazo mioeléctrico, le pareció que no soportaría su estilo de vida. “Aún monto en moto, manejo la motosierra y parto leña a mano”, dice Davis. “Soy bastante exigente (respecto a los aparatos protésicos) y no creo que los mioeléctricos estén a la altura. Pero la garra Trautman está muy conseguida y es dura. Sin duda yo sería un posible usuario.”

Con la retroalimentación que aportan esos pacientes, Kulinholm está afinando el diseño de la próxima serie de prototipos. Afirma que la simplicidad de la garra original —tres piezas metálicas y dos tornillos— hacen de ella un candidato prometedor por sus posibilidades de personalización y perfeccionamiento. Por ejemplo, podría hacerse de una aleación más ligera y quizá quepa modificarla para aumentar la fuerza de agarre. Pero el fallo principal ya está solucionado. Para que la garra se abriera y se cerrara adecuadamente, había que aflojar uno de los tornillos; con el tiempo el orificio se

UN CLASICO PUESTO AL DIA

Inventada en 1925, la garra Trautman es robusta, sencilla y barata; sigue siendo la prótesis sustitutiva preferida por numerosos amputados de manos o brazos. Cuando su fabricante, la Paul Trautman Company, cesó su actividad en la década de los noventa, los usuarios continuaron vendiendo y comprando y reparando sus viejas unidades.

DISEÑO ORIGINAL

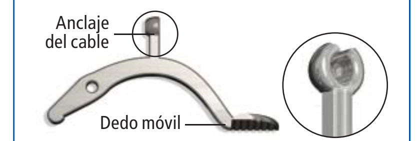
Anclaje del cable
Dedo móvil
Dedo fijo
Asa de banda de caucho
Fijación atornillada

NUEVO DISEÑO

Placa
Arandela del tornillo

Anclaje del cable

PROBLEMA:
Roturas frecuentes en la unión del anclaje del cable con el dedo móvil

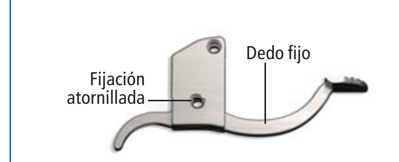


SOLUCION:
Aumentar la sección transversal del anclaje del cable; añadir un nervio a la base del anclaje para distribuir mejor la carga.

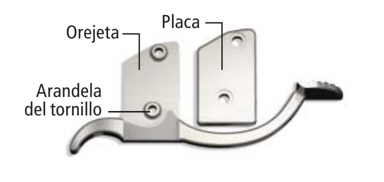


Fijaciones de tornillo

PROBLEMA:
El constante giro entre los dedos móvil y fijo sobre la fijación atornillada hace que el tornillo escarie la rosca del orificio; el mecanismo, empero, se agarrota si los tornillos se aprietan más.



SOLUCION:
Se añaden arandelas para los tornillos; los dedos se montan entre la orejeta y la placa. Así, el dedo móvil rota sobre la arandela y no sobre el tornillo; el intersticio entre la placa y la orejeta es fijo, aunque los tornillos se aprieten demasiado.



SLIM FILMS

agrandaba y el tornillo bailaba. Para solventar el problema, muchos usuarios terminaban por pasar una broca por el orificio, lo rellenaban de soldadura y luego abrían un nuevo orificio. Pero las reparaciones sucesivas suponían un desgaste excesivo del mecanismo. Andy Richards y Richard Sorge, alumnos de la Universidad estatal de Carolina del Norte, han modificado el diseño para corregir el problema.

Curran espera impaciente la próxima hornada. Muchos de sus pacientes eran veteranos de la II Guerra Mundial, ancianos acostumbrados a lo que ya tenían que demandaban pocas innovaciones para sus prótesis. Pero ha empezado a ver que crece el número de pacientes más jóvenes, especialmente soldados que vuelven de Irak. “Me agradaría saber qué piensa de este aparato la gente más joven y que lo comparen con los prototipos modernos”, dice.

Además de ayudar a estadounidenses, un mecanismo sencillo y barato como la garra Trautman sería inestimable en los países en vías de desarrollo, donde la guerra, una sanidad pública deficiente y el trabajo manual son el pan de cada día. En esas zonas la población de amputados de miembros superiores crece a un ritmo alarmante; las prótesis pueden ser cruciales para recuperar una actividad laboral remunerada. Sin embargo, una aguda falta de fondos impide que la mayoría de los amputados reciba una prótesis sencilla, barata y duradera. “Tenemos que pensar en el exterior de EE.UU.”, dice Curran. “Necesitamos mirar a Arabia Saudí, India, China, Sierra Leona, Bangladesh y otros países del mundo donde, por desgracia, algunas de las amputaciones son punitivas.

Cuestión de dinero

La clave para que las prótesis de gancho lleguen a quienes las necesitan estriba en dar con un distribuidor dispuesto a comercializarlas internacionalmente. Pero eso es más fácil de decir que de conseguir. “Cuando me he mo-

2. PROTOTIPO de mano protésica montada mediante bloques de plástico de construcciones Lego por John Bergmann, voluntario en Tackle Design. Cada dedo se pliega y despliega con independencia de los demás; la muñeca se dobla y rota con naturalidad. Las piezas Lego ofrecen un método rápido y flexible para experimentar diseños nuevos y complejos.



vido entre distintas compañías preguntando si estarían dispuestas a ayudar, todas hacían la misma pregunta”, declara Curran. “‘¿Cuántas venderé al año?’ Si no hay un beneficio potencial sustancioso, simplemente no les interesa.” Y con tantas opciones ya disponibles, ¿a qué viene con otro aparato, en un mercado plagado de obstáculos financieros?

Según Kuniholm, es para desesperarse. Podríamos desde luego decir que ya está inventado todo lo que había que inventar. Y está claro que se dispone de una gran cantidad de dispositivos protésicos que hacen muy bien diferentes funciones. “Pero”, apunta, “en el mercado todavía no hay un sustituto aceptable de una mano”.

William J. Hanson, presidente de Liberating Technologies (LTI), de Holiston, Massachusetts, fabricante y distribuidor de componentes para prótesis de miembros superiores, explica que su empresa distribuyó las primeras prótesis de gancho escindido hechas de titanio en EE.UU. Pero, como la mayoría de las compañías protésicas, LTI desplazó su atención desde los garfios hacia dispositivos más modernos, mecánicos o mioeléctricos.

Hosmer Dorrance Corporation, radicada en Campbell (California), es uno de los mayores productores de prótesis para extremidades superiores e inferiores. Karl Hovland, presidente de la compañía, recuerda que a lo largo de los años se recibieron muchas consultas sobre las prótesis Trautman. Añade que siempre estuvieron aparcadas porque nunca prometieron unas

BRAZOS Y ATLETISMO

Los accesorios modulares, como la “paleta” de baloncesto que lleva en el brazo izquierdo la jugadora de la izquierda, pueden convertir un brazo artificial en una herramienta especializada. Hay también accesorios personalizables para:

- **Béisbol**
- **Billar**
- **Ciclismo**
- **Golf**
- **Jockey**
- **Tiro al blanco**
- **Esquí**
- **Softball**
- **Gimnasia en suelo**
- **Halterofilia**

THE OPEN PROSTHETICS PROJECT (*prototipo de Lego*); DEREK MONTGOMERY *AP Photo* (*jugadoras de baloncesto*)

ganancias lo bastante altas como para justificar una inversión. "Lo sopesamos, ya lo creo, pero los números tienen que cuadrar." La inversión es aún más arriesgada porque Medicare —la medicina pública para jubilados en Estados Unidos— recientemente unificó su sistema de reembolso de facturas por "servicios ortésicos y protésicos". Como resultado, para algunos tipos de prótesis de gancho funcionales ahora son menores los reembolsos. "No hay incentivo si el reembolso es menor que lo que hemos de cargar por ellas", dice Hovland. "Deseamos hacer todo lo que podamos por los pacientes, pero ésta es una empresa lucrativa."

Y ahí reside el problema. La visión de Kuniholm de "poner el bien público por encima de los beneficios" sigue chocando con los inconvenientes de fondo. Sin embargo, Kuniholm sigue buscando fabricantes, mercados y canales de distribución para la prótesis Trautman. Su esperanza es encontrar una empresa que preste desinteresadamente sus servicios de comercialización electrónica y de gestión de pagos y pedidos, o mejor aún, una empresa que ya esté desarrollando aparatos protésicos y que se muestre dispuesta a hacerse cargo de los diseños de la OPP.

"La realidad", observa, "es que en el campo de la prótesis no hay incentivo económico tradicional que mueva a ponerse manos a la obra y mejorar los diseños. No significa que a nadie le importe, pero la mayoría de la gente carece de dinero e información para magnificar los esfuerzos y mejoras que aportan. Creo que si ponemos a disposición de todos la información generaremos unos beneficios sociales mucho mayores que si comercializamos y vendemos las ideas. Nuestro objetivo es crear un procedimiento para compartir esos esfuerzos y mejoras con cualquiera que los necesite."

Muchas cabezas piensan más que una sola

El Open Prosthetics Project (OPP) ha expandido la colaboración en línea, llevándola del desarrollo de programas de ordenador al diseño y ensayo de varios aparatos. No se trata sólo la garra Trautman. He aquí algunos ejemplos:

ATALAJE ACCIONADO POR EL CUERPO

Un atalaje barato y lavable cosido a una camiseta elástica absorbente de humedad que se conecta al cable que controla la acción de una garra u otra prótesis de agarre.

ALGUNOS DE LOS OBJETIVOS PARA LOS COLABORADORES EN LINEA:

- Idear un procedimiento robusto y cómodo para fijar el atalaje a la camiseta
- Desarrollar un procedimiento sencillo para que el usuario una el cable al atalaje

GANCHO PARTIDO

Un gancho "doble" que aprieta o se afloja cuando un mecanismo de cable cambia la separación entre los dos ganchos.

ALGUNOS DE LOS OBJETIVOS PARA LOS COLABORADORES EN LINEA:

- Diseñar una versión actualizada que pueda hacerse de plástico ligero y sin metales (que pase los controles de seguridad de los aeropuertos)
- Rebajar los costos de fabricación por debajo de 100 euros
- Proporcionar unas superficies de agarre que ofrezcan la máxima flexibilidad al usuario

PRENSORES VECTORIALES

Un medio sencillo para ajustar la fuerza de cierre de la banda de caucho o del muelle que se opone al tirón del usuario sobre el cable que abre un gancho partido o unas pinzas.

ALGUNOS DE LOS OBJETIVOS PARA LOS COLABORADORES EN LINEA:

- Minimizar los costos de fabricación
- Idear un conjunto de piezas para actualizar las garras ya existentes

SISTEMAS DE SUSPENSION

Un procedimiento para sujetar una prótesis al cuerpo de un amputado basado en el principio de la "trampa china de dedos". Esta actúa porque un material tejido o trenzado se contrae según un eje a la vez que se expande según el otro. Jonathan Kuniholm ha probado un manguito flexible prototipo sobre el muñón de su propio brazo.

ALGUNOS DE LOS OBJETIVOS PARA LOS COLABORADORES EN LINEA:

- Lograr agarre en un miembro residual lo más corto posible
- Eliminar la humedad de la piel
- Ajustar el trenzado para una óptima relación entre las fuerzas de tracción y contracción

THE OPEN PROSTHETICS PROJECT

Bibliografía complementaria

ONE-HANDED IN A TWO-HANDED WORLD. Segunda edición. Prince-Gallison Press, 2000.

DEMOCRATIZING INNOVATION. Eric von Hippel. MIT Press, 2005.

Para más información acerca del Open Prosthetics Project, visite http://openprosthetics.wikispot.org/Front_Page

Para una explicación de las numerosos variedades de prototipado rápido como medio para reducir el tiempo de diseño y desarrollo de un objeto tridimensional nuevo, visite http://en.wikipedia.org/wiki/Rapid_prototyping

Para una video-demostración del brazo robótico construido por Dean L. Kamen, visite www.youtube.com/watch?v=1hzRja9eunY

Plancton bacteriano de los océanos

Comenzamos a entender la importancia de este grupo de organismos, que destaca por su abundancia, funciones ecológicas y diversidad

José M. González, Carlos Pedrós-Alió y Josep M. Gasol



CONCEPTOS BASICOS

- Los océanos constituyen un extenso ecosistema que contiene una biomasa microbiana equiparable a la de plantas y animales.
- El bacterioplancton incluye una gran diversidad de organismos de los dominios *Bacteria* y *Archaea*.
- La actividad de estos microorganismos resulta esencial para los ciclos biogeoquímicos de la biosfera.
- Merced al estudio de los microorganismos en su ambiente natural se han descubierto nuevas vías metabólicas que se desarrollan en el ecosistema marino, quizás el de mayor extensión en la Tierra.

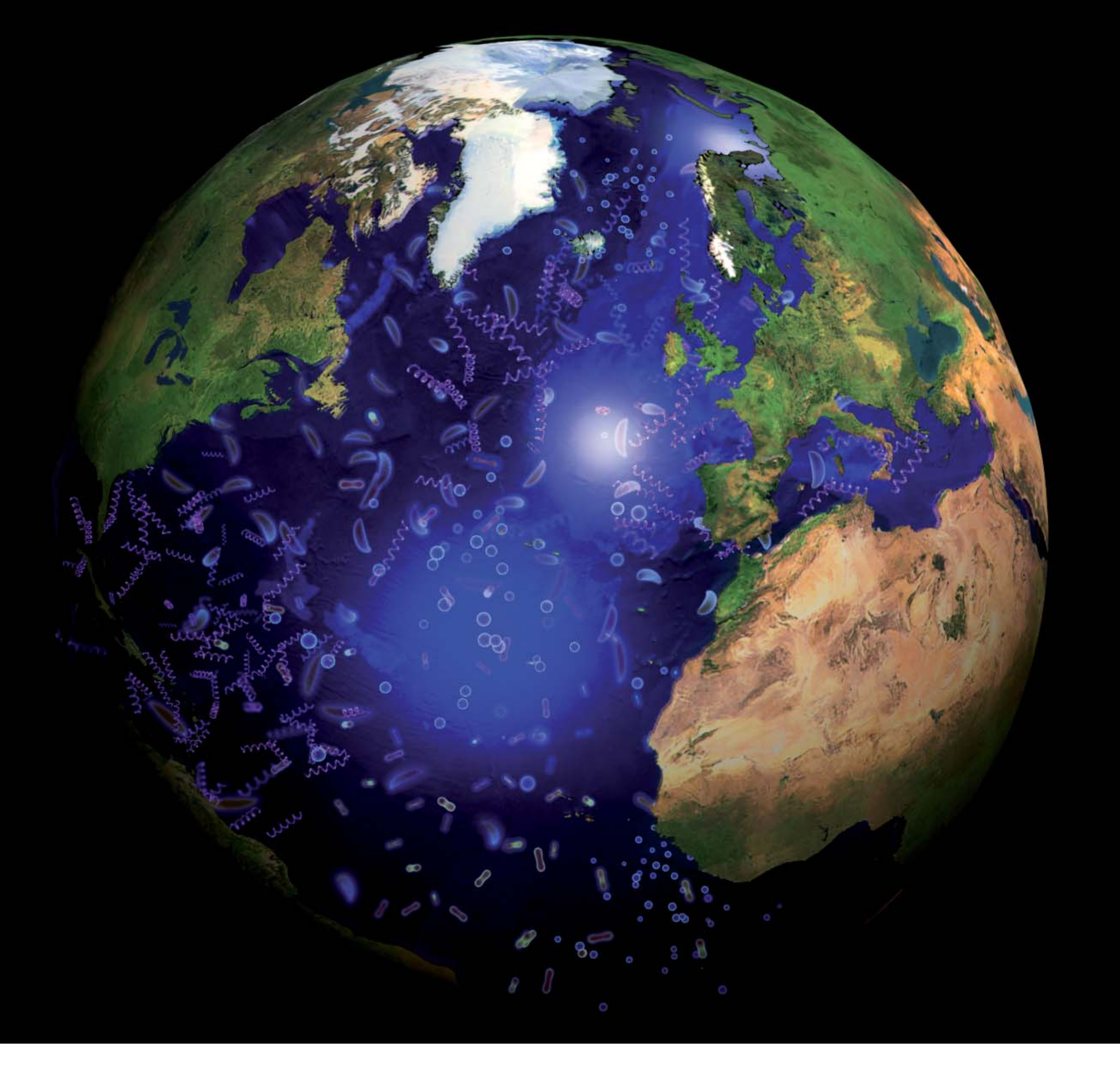
Las bacterias se han considerado a menudo meros seres primitivos, simples y mínimos. ¿Es cierto? Al tratarse de organismos unicelulares, presentan, sin duda, un tamaño muy reducido. Pero su supuesta simplicidad es sólo aparente: su complejidad no se manifiesta en forma de variedad morfológica, sino a través de una amplia diversidad de estrategias metabólicas. Proliferan en ambientes cuyas condiciones físico-químicas y fuentes de energía evidencian una llamativa variabilidad. Tampoco se les cataloga entre los organismos primitivos, si atendemos a su facilidad para intercambiar información genética y su notable capacidad de adaptación.

Las bacterias se hallan sometidas a presiones evolutivas distintas de las que afectan a los eucariotas, de mayor complejidad morfológica. Se han adaptado a todos los medios. Los océanos forman un vasto espacio en la biosfera donde las bacterias proliferan y dominan, en número y actividad, sobre otros organismos. Dada la extensión de los océanos, las funciones ecológicas de las bacterias que allí medran revisten suma importancia para la vida en la Tierra.

Los océanos ocupan el 71 por ciento de la superficie del planeta. Su profundidad media ronda los 4000 metros y la máxima es de 11.000 metros. La salinidad es elevada (35 gramos por litro), básico el *p*H (entre 8,3 y 8,5) y gélida la temperatura media (4 ºC). Por debajo de la zona de acción de la luz solar, la zona fótica, la temperatura fluctúa entre 0 y 5 ºC, con la excepción de los mares cerrados como el Mediterráneo. En las regiones polares existe agua líquida por debajo de 0 ºC; ello se debe a la presencia de sal, que reduce el punto de congelación a –1,8 ºC. La mayor parte del volumen oceánico corresponde al mar abierto. Se trata de un ambiente en apariencia homogéneo, con cierta estratificación de masas de agua que se mezclan lentamente debido al flujo de corrientes, circulaciones verticales y mareas en zonas costeras.

En el medio acuático escasean los nutrientes. Es un medio oligotrófico. Elementos como el nitrógeno, el fósforo y el hierro resultan esenciales para los seres vivos y limitan, por tanto, la producción oceánica. En la zona más productiva, la superficie, esos nutrientes se encuentran en concentraciones inferiores a 1 gramo por cada 1000 litros. Existen fenómenos, naturales y antropogénicos, que incrementan las concentraciones de nutrientes; pero se trata de episodios efímeros, dado que el plancton bacteriano y las algas consumen rápidamente los nutrientes. Las zonas profundas se hallan sometidas a una gran presión hidrostática y a temperaturas inferiores a las superficiales. Son afóticas (no llega la luz). Al no producirse la fotosíntesis, la concentración de carbono orgánico es menor que en la superficie.

Las bacterias oceánicas presentan adaptaciones para multiplicarse en ese medio, en el que se mueven erráticamente, a merced de las corrientes de agua. Debido a su número, diversidad y actividad, el bacterioplancton constituye una pieza fundamental del entramado biológico oceánico.

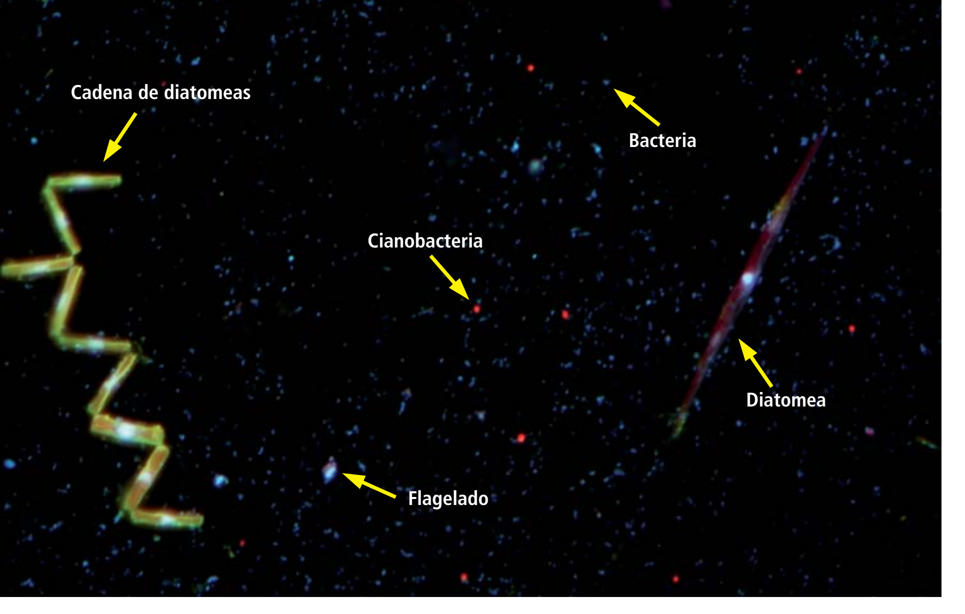


1. **EL NUMERO DE BACTERIAS** en los océanos es de alrededor de 10^{29}, un número tan elevado que resulta inconcebible.

Número y tamaño

La parte más productiva de los océanos es la zona fótica, donde penetra la luz solar: hasta unos 200 metros de profundidad. La cantidad media de bacterias en la zona fótica es de 500.000 por centímetro cúbico, cifra elevada si tenemos en cuenta la escasez de nutrientes orgánicos e inorgánicos. Su tamaño oscila entre 0,2 y 2 micrometros (*Escherichia coli* presenta un tamaño de varios micrometros). Las bacterias heterótrofas (que consumen materia orgánica) no suelen ser mayores que 0,8 micrometros. El tamaño reducido constituye una ventaja porque, para una esfera de naturaleza cualquiera, la proporción entre la superficie y el volumen es mayor cuando menor es el tamaño. En las bacterias, una mayor superficie en relación con el volumen optimiza el flujo de nutrientes hacia el interior. Ello reviste suma importancia en un medio tan diluido en nutrientes como es el océano.

Por debajo de la zona fótica, la concentración de microorganismos cae a 100.000 por centímetro cúbico. En algunas regiones superficiales con escaso aporte de nutrientes la concentración de microorganismos disminuye también (100.000 por centímetro cúbico). En determinadas condiciones, la cantidad de microorganismos es superior. Cuando se producen proliferaciones de algas unicelulares (un fenómeno frecuente en regiones costeras), el número medio de bacterias supera el millón por centímetro cúbico. En los mares y las regiones costeras con un intercambio limitado con el agua oceánica, como algunas zonas del Mediterráneo, la abundancia de bacterias es superior.



2. PLANCTON MICROBIANO en el océano. Las bacterias que no fotosintetizan se tiñen de azul con 4',6'-diamidino-2-fenilindol o DAPI. Las cianobacterias fotosintéticas se ven rojas, debido a la fluorescencia de la clorofila cuando se les ilumina con luz azul. Algunos protozoos, flagelados, destacan por su tamaño ligeramente superior al de las bacterias. A la izquierda, una cadena de diatomeas; a la derecha, una diatomea solitaria. Se distinguen por la morfología y la presencia de clorofila.

Otro de los fenómenos naturales que incrementan la concentración local de nutrientes son los afloramientos: movimientos verticales de agua desde las profundidades. El movimiento de las aguas arrastra nutrientes minerales que no tardan en ser consumidos por el plancton bacteriano (fotosintético y heterótrofo) y por las algas. Las zonas de gran actividad pesquera suelen coincidir con regiones de afloramiento, en donde la actividad fotosintética es más intensa y la densidad de bacterioplancton es superior debido al aporte vertical de nutrientes.

La cantidad de bacterias que contiene el cuerpo humano nos resulta casi inconcebible (~10^{14} bacterias). El número total de bacterias que viven en los océanos es mayor todavía. Teniendo en cuenta que los océanos ocupan un total de $1{,}5 \times 10^9$ km^3, se estima que el número de microorganismos del bacterioplancton marino ronda los 10^{29}. Esa cifra corresponde a una biomasa equivalente a la biomasa total de algas marinas; es mayor que la de los peces y mamíferos del medio oceánico. La proporción de biomasa bacterioplanctónica respecto del total es mayor en regiones oligotróficas o zonas afóticas, donde alcanza valores de entre un 70 y un 80 por ciento.

Esa biomasa microbiana tan abundante ha pasado inadvertida a lo largo de la historia. Dado que su tamaño es del orden de la longitud de onda de la luz visible, el plancton bacteriano resulta casi invisible al microscopio óptico. Hace más de tres siglos, Antonie van Leeuwenhoek observó "animálculos" en muestras de agua de mar mediante un microscopio rudimentario. Sin embargo, hasta los años setenta del siglo pasado no empezaron los recuentos directos de bacterioplancton, mediante tinciones basadas en la unión de colorantes fluorescentes a los ácidos nucleicos.

Actividad biológica

La importancia de la biomasa bacterioplanctónica estriba en su diversidad genética, metabólica y fisiológica. El plancton bacteriano cumple múltiples funciones biológicas. Resulta sorprendente su capacidad para proliferar a bajas temperaturas (incluso a 0 ºC), concentraciones salinas elevadas y escasez de nutrientes.

Los medios de cultivo que suelen utilizarse en el laboratorio contienen una concentración de carbono orgánico más de 1000 veces superior a la del medio natural. *Escherichia coli* crece en el laboratorio a temperaturas "confortables" (unos 37 ºC) y concentraciones elevadas de nutrientes; en condiciones óptimas, se divide cada 20 minutos.

Los microorganismos oceánicos, debido quizás a su adaptación a los medios oligotróficos, no crecen en los medios artificiales del laboratorio (se recupera menos del 1 por ciento de las bacterias de la muestra). En su ambiente natural, las bacterias tardan horas o días en dividirse, lo que explica la dificultad de su investigación.

Durante su crecimiento, los microorganismos oxidan la materia orgánica de su medio con la liberación de CO_2. Más del 95 por ciento de la respiración que tiene lugar en el agua de mar se debe a la actividad de los microorganismos. Pero existe otro destino para la materia orgánica disuelta. Merced a la actividad de los microorganismos acuáticos, que metabolizan compuestos que otros seres vivos no utilizan, parte de la materia orgánica disuelta se transfiere a escalones superiores de la cadena trófica. La teoría de la reutilización de la materia orgánica (el "bucle microbiano") fue propuesta por Lawrence Pomeroy en 1974.

El modelo clásico de la cadena trófica (anterior a la teoría de Pomeroy) no entrañaba mayor complejidad. En su marco, la energía lumínica daba lugar al crecimiento de microorganismos fotosintéticos, que nutrían al zooplancton, que a su vez alimentaba a los peces. La función de las bacterias se limitaba a la mineralización de los desechos producidos por el resto de los miembros de la cadena trófica; su contribución a la productividad total de los océanos era, por tanto, mínima. Según Pomeroy, aunque parte de la materia orgánica se pierda en forma de CO_2, la materia orgánica que utiliza el bacterioplancton entra de nuevo en la cadena trófica, pues las bacterias la transforman en nutrientes para otros miembros de la misma. Asimismo, las bacterias ponen a disposición del resto de los organismos oceánicos otros nutrientes: nitrógeno, azufre, fosfato y hierro como consecuencia de la mineralización de los compuestos orgánicos que los contienen.

Las fuentes de carbono que sustentan la biomasa microbiana oceánica suelen ser locales. Tales fuentes dependen de la fijación de CO_2



atmosférico, debido a la actividad de las bacterias fotosintéticas y las algas unicelulares. Sin embargo, para que se produzca la fijación de CO_2, se requiere el aporte de otros nutrientes. El hierro y el fosfato provienen de la atmósfera; su concentración en la superficie del mar es extremadamente baja. El nitrógeno se requiere en mayor concentración que los otros dos elementos. Después del carbono, el nitrógeno es el elemento de mayor importancia para los organismos. El peso seco de una célula suele contener un 12 por ciento en nitrógeno.

De todos los seres vivos, sólo las bacterias cuentan con la maquinaria enzimática necesaria para transformar el nitrógeno atmosférico (N_2) en nitrógeno utilizable en forma de grupos amino (NH_3), tal como se encuentra en los aminoácidos de las proteínas. Existen bacterias fijadoras del nitrógeno terrestres en simbiosis con leguminosas y bacterias nitrofijadoras de vida libre. Ciertas bacterias oceánicas fotosintéticas (las del género *Trichodesmium*, por ejemplo) presentan la capacidad de fijar nitrógeno atmosférico.

La vida en el océano depende en grado sumo de la actividad nitrofijadora del plancton bacteriano, por la sencilla razón de que el nitrógeno resulta imprescindible para llevar a cabo la fotosíntesis, la base de la cadena trófica oceánica. Expresado de otra manera, la disponibilidad de nitrógeno constituye un factor clave para la regulación de la productividad biológica de los océanos.

Además del nitrógeno, los organismos requieren hierro y fósforo. La ausencia o escasez de esos nutrientes limita la productividad. El mar Mediterráneo es pobre en fósforo, en comparación con el nitrógeno y el hierro. La disponibilidad de hierro determina la composición y el tamaño de algunas comunidades bacterianas. La mayor parte del hierro y fósforo que hay en el mar abierto procede del polvo atmosférico en deposición; en menor grado, proviene también de afloramientos (corrientes ascendentes). Pero no todas las regiones oceánicas se ven afectadas por las deposiciones atmosféricas. Además, el hierro es poco soluble en agua salada y se combina con partículas que acaban precipitando en el fondo oceánico; se encuentra en cantidades casi indetectables, con concentraciones de sólo varios picogramos (10^{-9} gramos) por centímetro cúbico de agua. Las bacterias crecen también en medios con escasez de hierro; lo consiguen mediante la síntesis de compuestos con afinidad por este metal (sideróforos), que lo capturan y lo transportan hacia el interior de las células.

En las zonas de mayor profundidad, lejos de la luz solar y las deposiciones atmosféricas, el bacterioplancton vive a expensas de las partículas que sedimentan poco a poco hacia el fondo del mar. El carbono orgánico de la superficie se consume lentamente en su viaje hacia el sedimento.

Diversidad genética

Las bacterias se presentan en cuatro formas simples, visibles a través del microscopio: esféricas (cocos), alargadas (bacilos), en forma de coma (vibrios) y espirales (espirilos). Pero esa variedad morfológica no basta para la clasificación taxonómica. A diferencia de las plantas y los animales, las especies de bacterioplancton no se distinguen por sus rasgos morfológicos. Durante muchos años, las comunidades bacterianas se han descrito mediante técnicas tradicionales de cultivo en el laboratorio. No es fácil, sin embargo, obtener cultivos representativos del número y la diversidad de las bacterias en las muestras originales.

En los años ochenta del siglo pasado se desarrollaron nuevas técnicas de clasificación basadas en el análisis molecular. A partir de la secuenciación de ácidos nucleicos y proteínas, se realizó una clasificación evolutiva de los microorganismos que se habían cultivado hasta entonces. El parámetro de referencia más utilizado era el gen codificador de una de las tres moléculas de ARN ribosómico: el ARN ribosómico 16S. Se trata de un gen universal, presente en todos los organismos.

A partir de la secuencia del gen en cuestión se obtiene una "etiqueta" que facilita la comparación evolutiva entre seres vivos. Consta de una palabra de unos 1500 caracteres, con sólo cuatro letras (A, T, G y C), que se corresponden con las bases de la cadena de ADN (adenina, timina, guanina y citosina). Ese método de clasificación ha arrojado luz sobre la evolución de los microorganismos y ha posibilitado el estudio de los mismos en su ambiente natural.

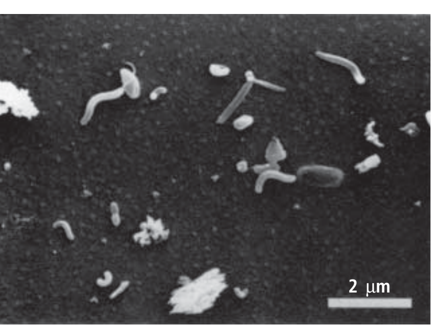
La descripción molecular de comunidades bacterioplanctónicas se basa, pues, en la extracción directa de ADN. Se amplifica y clona el ácido nucleico y se secuencian genes que sirven de cronómetros moleculares, como el ARNr 16S. Las secuencias obtenidas se comparan con las secuencias de organismos ya cultivados.

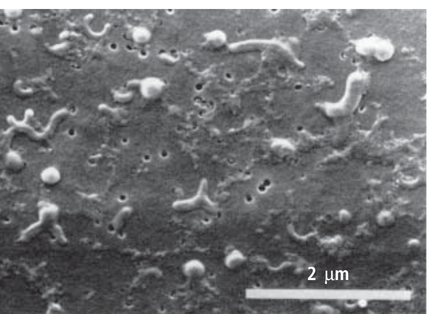
Adelantados de ese método fueron Norman Pace y sus colaboradores, de la Universidad de Indiana. A principios de los noventa analizaron una serie de clones procedentes del bacterioplancton oceánico. La mayoría de las secuencias obtenidas guardaban poca semejanza con las de los organismos cultivados hasta entonces. Otros estudios con muestras ambientales diversas demostraron que la mayoría de las bacterias no eran cultivables con los medios habituales del laboratorio. Sin duda,

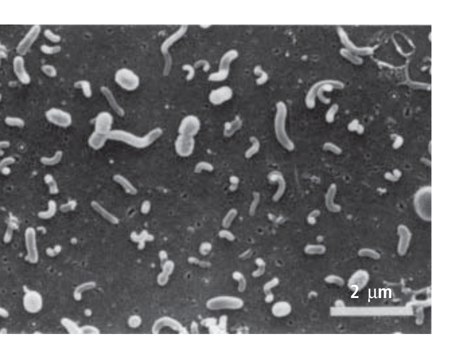
FORMAS BACTERIANAS

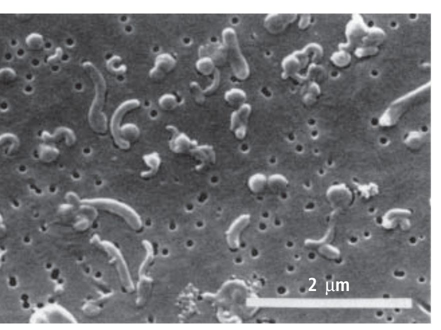
A través del microscopio se distinguen bacterias esféricas, alargadas, en forma de coma y espirales. Corresponden a las cuatro formas bacterianas básicas:











3. PLANCTON BACTERIANO DEL PACIFICO. Las bacterias de estas cuatro micrografías electrónicas quedaron retenidas en filtros con un tamaño de poro de 0,2 micrometros (μm). Aunque presentan rasgos morfológicos diferentes, éstos no bastan para la identificación taxonómica.

la aplicación de nuevos métodos de análisis génico habría de traer a primer plano la existencia de numerosas especies bacterianas que desconocemos.

Según los estudios genéticos, el bacterioplancton está dominado por grupos evolutivamente divergentes. Varios de ellos se han resistido al cultivo en el laboratorio (los medios ricos inhiben el crecimiento de la mayoría de las bacterias marinas). Y sin cultivo no hay forma de abordar la clasificación y la caracterización bioquímica, morfológica y genética. A través del cultivo se determinan las funciones ecológicas y la participación en los ciclos biogeoquímicos o ciclos de los elementos.

En los últimos cinco años, la descripción de los componentes del bacterioplancton, de su fisiología y metabolismo, ha sufrido una revolución debido al desarrollo de las técnicas de secuenciación metagenómica. En lugar de secuenciar un único gen (el ARNr 16S, por ejemplo), la secuenciación metagenómica se basa en la extracción de todo el ADN de muestras ambientales, sin ningún paso intermedio. Una vez purificado, se secuencian al azar un gran número de fragmentos que incluirán todos los genes de todos los microorganismos presentes en la muestra. El análisis de esas secuencias arroja luz sobre la extraordinaria diversidad de proteínas y funciones metabólicas del bacterioplancton.

Ciclos de los elementos

Los organismos complejos divergen entre sí en morfología y comportamiento. En las bacterias, la diversidad concierne, sobre todo, al metabolismo y a la fisiología. Sólo las bacterias utilizan el nitrógeno atmosférico para su crecimiento. Obtienen energía también de compuestos inorgánicos: ciertos gases (hidrógeno, monóxido de carbono y sulfuro de hidrógeno) y metales (hierro y manganeso). Las bacterias producen metano (CH_4). En condiciones anóxicas, ciertas bacterias respiran nitrato (NO_3^-) y emiten entonces otro gas de efecto invernadero, el óxido nitroso (N_2O). Estos son sólo algunos ejemplos del repertorio metabólico bacteriano. Las transformaciones biogeoquímicas —muchas de ellas exclusivas de las bacterias— son de vital importancia para los ciclos de los elementos en la biosfera. Sin esas transformaciones, impulsadas por los microorganismos, la vida dejaría de existir en la Tierra.

La función de los microorganismos empezó a considerarse en la época de Louis Pasteur, quien sugirió su participación en las transformaciones de la materia. A pesar del tamaño mínimo de las bacterias marinas, su actividad reviste máximo interés. Su respiración provoca una disminución de la concentración del oxígeno en las zonas profundas, pues el oxígeno atmosférico no se disuelve en el agua de mar con la misma celeridad con que se consume. Ante tal descenso en la concentración de oxígeno, las bacterias respiran NO_3^-. Si el producto de la respiración del oxígeno es agua, el del consumo de NO_3^- es gas nitrógeno (N_2), que escapa a la atmósfera, con lo que el medio marino se empobrece en dicho nutriente.

Los microorganismos desarrollan una función fundamental en la mayoría de los ciclos biogeoquímicos del medio acuático; sobre todo, los ciclos del carbono, el nitrógeno y el azufre. Existen otros elementos de interés, como ciertos metales pesados (hierro, manganeso, cromo, plomo, cobre, níquel, mercurio, etcétera), que en algunas fases de su ciclo biogeoquímico resultan contaminantes; los microorganismos poseen la maquinaria enzimática necesaria para transformarlos.

Azufre y clima

Una de las fases del ciclo del azufre es orgánica. Nos referimos a la que protagoniza el sulfuro de dimetilo (DMS), la principal forma de intercambio de azufre entre los océanos y la atmósfera. En buena parte, el olor a mar se debe al DMS presente en el aire. Escapan a la atmósfera unos 100 millones de toneladas de azufre (en forma de DMS) al año. Un tercio de esa cantidad se origina, mediante procesos biológicos, en los océanos. Cierta fracción procede de la actividad volcánica. La mayor parte tiene un origen antropogénico, aunque al limitarse a los continentes, su impacto en los océanos es menor.

El DMS se origina por descomposición enzimática del dimetilsulfoniopropionato (DMSP). El DMSP es uno de los compuestos orgánicos simples más abundantes en los océanos. Debido a sus propiedades higroscópicas, opera a modo de regulador osmótico: las algas unicelulares del fitoplancton sintetizan y acumulan DMSP para contrarrestar el efecto de la sal del agua de mar. El contenido de DMSP puede llegar al 10 por ciento del carbono total de la célula y al 75 por ciento del azufre que compone la biomasa algal. Las algas liberan DMSP al medio durante la lisis por senescencia o cuando son ingeridas por el zooplancton. Las bacterias lo metabolizan para obtener energía y carbono. Liberan entonces DMS, un compuesto muy volátil que escapa a la atmósfera, donde participa en la regulación del clima.

En la atmósfera el DMS es oxidado por la radiación ultravioleta; se forman aerosoles de sulfato que condensan la humedad e incrementan así la densidad de las nubes. Dado que las nubes limitan la cantidad de radiación que llega a la superficie terrestre, provocan



4. PLANCTON BACTERIANO incubado en presencia de DMSP radioactivo y teñido con DAPI (*azul claro*). La presencia de granos de plata expuestos (*coronas oscuras*) alrededor de la mayoría de las células demuestra la actividad de las mismas.

JOSE M. GONZALEZ, CARLOS PEDROS-ALIO Y JOSEP M. GASOL (*fotografía del plancton*)

una disminución de la temperatura. Se estima que, en ausencia DMS, la temperatura de la atmósfera sería de 3 a 4 ºC superior. El DMS atenúa, por tanto, el efecto invernadero. De ahí el interés en conocer los factores que regulan la concentración atmosférica de DMS.

La concentración de DMSP varía según la posición geográfica, la estación del año y la frecuencia de eventos efímeros como la proliferación de algas unicelulares. El ciclo del azufre se halla sometido a un mecanismo de retroalimentación: la liberación de DMS a la atmósfera provoca el aumento de la densidad de las nubes, con lo que disminuye la luz que recibe el fitoplancton y se limita, por tanto, la síntesis de DMSP.

Las bacterias también regulan la cantidad de DMS que se libera a la atmósfera. Existen dos vías para la transformación del DMSP. En una primera vía se forma DMS, que escapa a la atmósfera provocando el efecto climático mencionado. La célula utiliza parte del DMSP como fuente de carbono; el DMSP supone alrededor del 10 por ciento del carbono que las bacterias oceánicas consumen en la zona fótica.

En una segunda vía, el DMSP sirve a la bacteria como una fuente de azufre. El DMSP se encuentra en concentraciones 1000 veces inferiores a las del sulfato (SO_4^{2-}), uno de los principales iones del agua de mar. Sin embargo, las bacterias prefieren el azufre del DMSP al del sulfato. El motivo de esa preferencia guarda relación con la importancia del ahorro energético en un ambiente donde las fuentes de carbono son limitadas. En el mar, las fuentes de energía son tan escasas, que el plancton bacteriano necesita aprovecharlas al máximo. El metabolismo del sulfato implica la transformación del mismo en sulfuro de hidrógeno (H_2S); conlleva, pues, un gasto energético notable. La incorporación del DMSP, en cambio, requiere sólo la escisión de la molécula (un coste energético menor que la reducción de SO_4^{2-} a H_2S). La preferencia del DMSP frente al sulfato responde, pues, a motivos energéticos para la célula.



5. ARBOL FILOGENETICO que recoge algunas especies de bacterias cultivadas y clones obtenidos de muestras de ADN oceánico. Los nombres en cursiva corresponden a especies descritas; otros corresponden a bacterias que se han aislado pero que no se han clasificado todavía.

Bacterioplancton fotosintético

Los océanos consumen CO_2, el principal gas de efecto invernadero. La fijación de CO_2 en los océanos se debe a la actividad de las bacterias fotosintéticas y a las algas unicelulares. La fijación de CO_2 y formación de O_2 en los océanos supone la mitad de la fotosíntesis del planeta. Las bacterias fotosintéticas fijan el CO_2 como las plantas: lo convierten, mediante luz solar, en materia orgánica. Los factores que afectan al crecimiento de ese tipo de microorganismos acuáticos influyen, por tanto, en el flujo de CO_2.

La fotosíntesis bacteriana se debe, sobre todo, a los géneros *Synechococcus*, *Prochlorococcus* y *Trichodesmium*. A las bacterias fotosintéticas oxigénicas se les denomina también cianobacterias. *Synechococcus* es una bacteria esférica de unos 0,9 micrometros de diámetro. *Prochlorococcus* también es esférica, pero su diámetro mide sólo 0,6 micrometros; se trata del organismo fotosintético conocido de menor tamaño y el que alcanza mayores densidades (hasta 100.000 células por centímetro cúbico). Debe su éxito a la capacidad de crecer en condiciones variables de luz y profundidad.

Trichodesmium corresponde a una bacteria filamentosa; mide entre 0,5 y 4 micrometros. Se advierte a simple vista, debido a que forma pequeñas colonias o agregados en suspensión. Aloja en su citoplasma vacuolas de gas que le facilitan la flotación y, por tanto, la permanencia en las capas altas (zona fótica). Ampliamente distribuida por los océanos, sobre todo en regiones tropicales y subtropicales, prolifera hasta formar extensas manchas en la superficie, de entre 10 y 100 kilómetros de diámetro. Estas manchas perduran varias semanas hasta que se agotan los nutrientes o sufren la agresión de la radiación ultravioleta.

Trichodesmium puede utilizar también N_2 en su metabolismo. Contribuye así al aporte de nitrógeno a la zona fótica. Transforma el nitrógeno en compuestos asimilables por otros integrantes del bacterioplancton y por las algas que no tienen la capacidad de fijar N_2. Ese nitrógeno se introduce entonces en la cadena trófica, ya que *Trichodesmium* se encuentra en la base de la cadena trófica. Buena parte del nitrógeno utilizable por el bacterioplancton, fitoplancton, zooplancton y otros componentes de la cadena trófica proviene de la actividad nitrofijadora de bacterias como *Trichodesmium*. El nitrógeno así fijado supera el nitrógeno que llega a los océanos a través de los ríos.

Bacterioplancton heterótrofo

Se estima que entre el 10 y el 20 por ciento de las bacterias oceánicas heterotróficas pertenecen al género *Roseobacter*. Se trata de uno de los componentes más activos del plancton bacteriano: transforma compuestos como el DMSP y obtiene energía de varias fuentes. A diferencia de otros grupos, *Roseobacter* sí se cultiva en el laboratorio. Ello ha facilitado el estudio de los mecanismos que adoptan las bacterias oceánicas para sobrevivir y proliferar, así como la comprensión del modo en que su actividad influye en los ciclos de los elementos.

Hay miembros del grupo *Roseobacter* que poseen pigmentos para la captación de la luz, sobre todo carotenoides y bacterioclorofila *a*. Aunque no son organismos fotosintéticos (no fijan CO_2 en su metabolismo), tal peculiaridad les supone una ventaja para competir con otros microorganismos que carecen de pigmentos. Al servirse de la energía lumínica, consumen una cantidad inferior de materia orgánica y, por tanto, permanece en sus células una proporción mayor de carbono. Utilizan la luz y la materia orgánica de forma simultánea para generar ATP; resisten períodos de tiempo más largos en ausencia de nutrientes y presencia de luz, que en ausencia de luz.

En las bacterias del género *Roseobacter* hallamos una concentración de pigmentos menor que en los organismos fotosintéticos. Se explica por su metabolismo, más versátil: utilizan también fuentes de energía orgánicas. Los organismos fotosintéticos dependen de

Los autores

José M. González trabaja en el departamento de microbiología y biología celular de la Universidad de La Laguna. Se dedica a la ecología, taxonomía, sistemática molecular y genómica bacteriana. Obtuvo su doctorado en la Universidad de Georgia. **Carlos Pedrós-Alió** y **Josep M. Gasol** desarrollan su labor en el Instituto de Ciencias del Mar del CSIC en Barcelona.

JOSE M. GONZALEZ, CARLOS PEDROS-ALIO Y JOSEP M. GASOL

la intensidad luminosa exclusivamente, sobre todo en el medio oceánico, donde se produce un movimiento vertical continuo.

Los microorganismos dotados de un metabolismo mixto, en cambio, no están tan condicionados por los ciclos diurnos de intensidad luminosa, estratificación, profundidad o la longitud de onda de la radiación. La capacidad de combinar respiración y captación de luz les convierte en unos microorganismos muy eficientes, mejor adaptados para aprovechar las escasas fuentes de carbono que se hallan disueltas en el medio marino. Los microorganismos con metabolismo mixto se descubrieron hace más de tres decenios. Pero hasta el año 2000 no empezó a cuantificarse la contribución en el ambiente oceánico de ese mecanismo de captación de energía luminosa.

Roseobacter obtiene también energía mediante la oxidación del monóxido de carbono (CO), en un proceso que libera CO_2. El CO es un gas de efecto invernadero; se forma en la combustión incompleta de carburantes (origen antropogénico) y en la descomposición de materia orgánica disuelta por efecto de la radiación ultravioleta sobre la superficie oceánica. La capacidad para metabolizar CO se halla poco extendida en otros grupos de bacterias, marinas y terrestres.

Además del CO, *Roseobacter* oxida también compuestos inorgánicos de azufre, como H_2S o el ion sulfito (SO_3^{2-}); ambos se generan a partir de la degradación de compuestos orgánicos de azufre (DMSP) o se obtienen de fuentes de azufre inorgánico (sedimentos marinos o zonas anaeróbicas en las partículas en suspensión). La capacidad de obtener energía a partir de tantas fuentes (luz, materia orgánica, CO, compuestos inorgánicos de azufre) constituye una gran ventaja para *Roseobacter*, puesto que le permite aprovechar recursos de los que otros seres vivos no pueden beneficiarse.

Los Bacteroidetes corresponden a otro de los grupos abundantes en el océano. Muchos de ellos tienen la capacidad de degradar compuestos poliméricos como la quitina, el almidón o la celulosa. Algunos, además, se benefician de la luz de forma similar a *Roseobacter*; utilizan para ello una proteína denominada rodopsina.

Siempre se había pensado que los microorganismos marinos absorbían la energía de la luz sobre todo por medio de la clorofila. Sin embargo, estudios metagenómicos que comenzaron en el año 2000 demuestran que uno de los pigmentos más abundantes que absorben la luz en la superficie de los océanos es la rodopsina. Esta proteína de la membrana celular se halla ampliamente extendida en la naturaleza: se encuentra en las bacterias y en la retina de los vertebrados, incluidos los humanos. Es la responsable de que el ojo humano detecte las distintas longitudes de onda que se corresponden con los colores. La rodopsina contiene en su interior una pequeña molécula, el retinal, un derivado de la vitamina A; cuando éste absorbe un fotón, se producen cambios configuracionales en el retinal y en la proteína.

En las bacterias marinas la rodopsina desarrolla una función completamente distinta. Los cambios configuracionales forman parte de un ciclo de transferencia de energía en el interior de la rodopsina que dura apenas 15 milisegundos y resulta en la transferencia de protones al exterior de la célula bacteriana. Esta energía en forma de gradiente de protones se transforma luego en energía bioquímica (ATP).

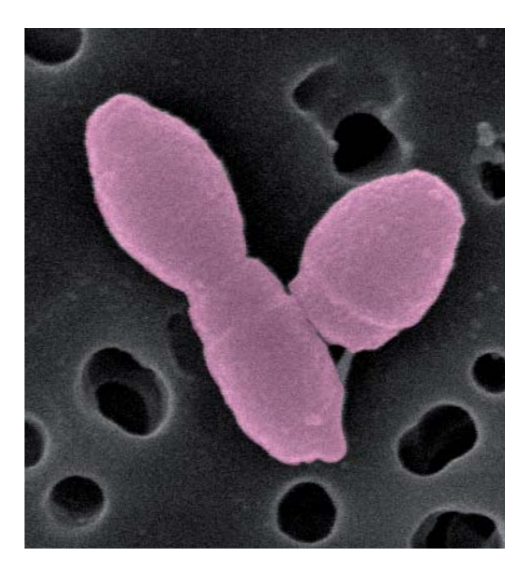
Las arqueas y el grupo SAR11 corresponden a otros de los componentes más abundantes del bacterioplancton. Estos microorganismos, sin



6. LAS CELULAS de *Trichodesmium* se agregan en filamentos que se observan a simple vista (×1000).

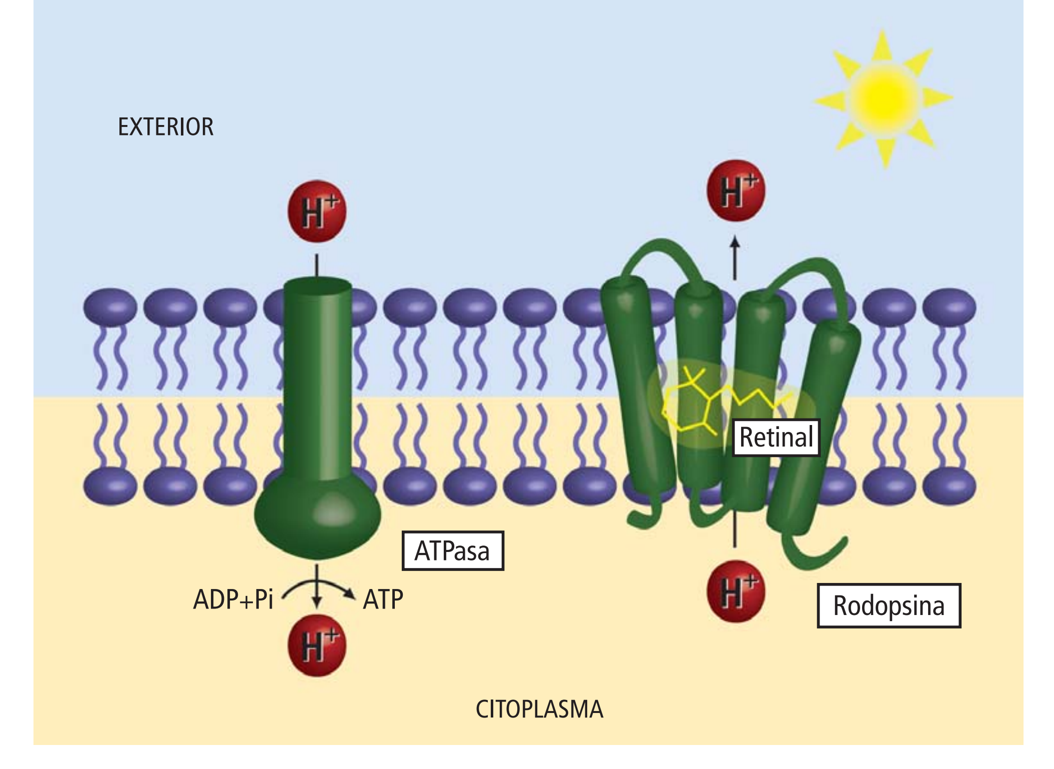


7. CULTIVO de *Prochlorococcus*, probablemente el microorganismo fotosintético oceánico más abundante. Las zonas más oscuras corresponden a membranas que contienen pigmentos fotosintéticos.



8. BACTERIA del género *Roseobacter*. Aunque no es fotosintética, posee pigmentos para captar la luz. Metaboliza también monóxido de carbono y compuestos inorgánicos de azufre.

JOHN PATCHETT, UNIVERSIDAD DE WARWICK Y MARK SCHNEEGURT, UNIVERSIDAD ESTATAL DE WICHITA (*arriba*); NATURE PUBLISHING GROUP (*centro*); JOSE M. GONZALEZ, CARLOS PEDROS-ALIO Y JOSEP M. GASOL (*abajo*)



9. LA RODOPSINA es una proteína de membrana que absorbe fotones por medio de la molécula de retinal. Se halla ampliamente extendida en la naturaleza: se encuentra en las bacterias y en la retina de los vertebrados. En los humanos, es la responsable de que nuestro ojo detecte las distintas longitudes de onda que se corresponden con los colores. En las bacterias, los cambios conformacionales del retinal resultan en el bombeo de protones (H^+) al exterior de la célula; el gradiente de protones resultante se convierte por fin en energía bioquímica (ATP).

JOSE M. GONZALEZ, CARLOS PEDROS-ALIO Y JOSEP M. GASOL

embargo, nos retrotraen a un mundo microbiano apenas explorado. SAR11 se descubrió, en 1990, en el mar de los Sargazos, que le da nombre. En las aguas someras, constituye alrededor de un tercio del plancton bacteriano; abunda menos en las profundidades. La densidad de SAR11 guarda relación con los ciclos estacionales y con la concentración de materia orgánica disuelta; participa en el ciclo del carbono, que afecta a la concentración atmosférica de CO_2.

En 2002 se consiguieron los primeros cultivos de SAR11, en medios que simulaban la escasez de nutrientes del océano. Las células de SAR11 así cultivadas presentan forma de vibrio; no miden más de 1 micrometro de largo y 0,2 micrometros de diámetro. Tardan unos días en dividirse (un tiempo de generación semejante al del bacterioplancton en el medio natural). Parece que su crecimiento no se ve afectado por la luz solar; deben de obtener la energía a partir de la materia orgánica disuelta. Dadas la procedencia y ubicuidad de esa especie, se le ha dado el nombre de *Pelagibacter ubique*.

Las arqueas se descubrieron en el plancton marino en 1992. A diferencia de SAR11, aún hoy en día las arqueas marinas no se han cultivado en el laboratorio. Todas las arqueas que se han cultivado proceden de ambientes sometidos a condiciones extremas: temperaturas altas (por encima de los 100 ºC) y concentraciones salinas elevadas (mayor que la del océano). Algunas son arqueas anaerobias; generan metano como producto de su metabolismo. Su presencia en la columna de agua se detecta sólo por métodos indirectos, como la amplificación y secuenciación de clones.

Seguimos sin conocer la función de las arqueas. Investigaciones recientes, apoyadas en técnicas isotópicas, demuestran que incorporan aminoácidos y carbono inorgánico. La fijación de CO_2 reviste especial interés porque afecta al ciclo global del carbono. Dado que no dependen de la intensidad de la luz, podrían mantenerse activas hasta las zonas más profundas del océano, a diferencia de las bacterias fotosintéticas. Se trata de uno de los grupos de microorganismos marinos más abundantes; su capacidad fijadora del CO_2 tiene repercusión en las condiciones del océano.

Perspectivas

Cada uno de los grupos mencionados (entre ellos *Roseobacter*, Bacteroidetes, SAR11, arqueas y bacterias fotosintéticas) comprende una rica diversidad de microorganismos que comparten características y evidencian particularidades que definen uno o varios nichos ecológicos. El estudio de la diversidad, la distribución temporal y espacial de las comunidades y de su actividad no puede liberarse del sesgo que supone la limitación de las muestras: se han examinado sólo los microorganismos que crecen en las condiciones artificiales del laboratorio.

Con todo, en el último decenio se han estudiado algunos microorganismos en su ambiente natural (*in situ*), con técnicas de manipulación de ácidos nucleicos. Los resultados sugieren la existencia de un universo de microorganismos todavía por conocer. La aplicación de nuevas técnicas de estudio (uso de isótopos, de sustancias inhibidoras de determinadas actividades de los ciclos de los elementos, medidas *in situ* de la actividad de ciertas enzimas y del flujo de los elementos, bioensayos, medición de la expresión génica, etcétera) ha arrojado luz sobre la función ecológica del bacterioplancton oceánico.

Bibliografía complementaria

PROKARYOTES: THE UNSEEN MAJORITY. W. B. Whitman, D. C. Coleman y W. J. Wiebe en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 95, págs. 6578-6583; 1998.

ENVIRONMENTAL DIVERSITY OF BACTERIA AND ARCHAEA. E. DeLong y N. R. Pace en *Systematic Biology*, vol. 50, págs. 470-478; 2001.

GENOME SEQUENCE OF *SILICIBACTER POMEROYI* REVEALS ADAPTATIONS TO THE MARINE ENVIRONMENT. M. A. Moran et al. en *Nature*, vol. 432, págs. 910-913; 2004.

ENVIRONMENTAL GENOME SHOTGUN SEQUENCING OF THE SARGASSO SEA. J. C. Venter et al. en *Science*, vol. 304, págs. 66-74; 2004.

GENOME ANALYSIS OF THE PROTEORHODOPSIN-CONTAINING MARINE BACTERIUM *POLARIBACTER* SP. MED152 (FLAVOBACTERIA). González et al. En *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 105, págs. 8724-8729; 2008.

Cómo afrontar la pertinaz crisis del petróleo

Ante la acelerada demanda mundial de automóviles, la mejor solución es rediseñar los coches y el sistema de transportes

Jeffrey D. Sachs

Según estadísticas recientes, los conductores norteamericanos respondieron a la brusca subida de los precios de la gasolina de hace unos meses utilizando menos el coche. Sin embargo, sería absurdo confiar en que ahorros de esa naturaleza vayan a contener, con el paso del tiempo, el precio del petróleo en el mundo: los principios básicos de la oferta y la demanda harán que sean caros en años venideros. Aunque los automovilistas norteamericanos consumen 13 millones de barriles diarios (mbd) de los 85 mbd que supone la demanda mundial, el aumento del número de vehículos en China, India y otros países en vías de desarrollo superará cualquier recorte de la demanda.

La producción de petróleo crudo en el golfo Pérsico se ha mantenido bastante estable, poco más de 20 mbd, desde principios del decenio de los setenta. A partir de entonces, los yacimientos ajenos a Oriente Medio han satisfecho el crecimiento de la demanda mundial, pero muchos de ellos han alcanzado los límites de su producción y otros importantes comienzan a declinar. No cabe esperar que se produzcan nuevos descubrimientos que puedan cubrir la acelerada demanda mundial.

Los 18 millones de barriles extraíbles asequiblemente, según se supone, de aguas protegidas del litoral norteamericano satisfarían unos siete meses de la demanda mundial de 2008, y una fracción mucho menor para cuando lleguen al mercado, en 10 o 15 años. Y este pequeño suplemento supondría enormes costes ambientales.

China cuenta con 50 millones de coches, camiones y autobuses (unos 40 por cada mil personas), en comparación con los 250 millones en EE.UU. (en torno a 800 por cada mil personas). Si China alcanzara sólo la mitad de vehículos per cápita que EE.UU., sumaría unos 500 millones, el doble que en EE.UU. hoy. Los avances de ingeniería en la producción de automóviles acelerarán esta tendencia espectacularmente. Los coches de bajo coste, como el Tata Nano indio, de la gama turismo, que cuesta allí menos de 2000 euros, harán posible que cientos de millones de familias de la nueva clase media puedan convertirse en propietarios en las próximas décadas. En la actualidad, circulan alrededor de 900 millones de coches, camiones y autobuses por las calles y carreteras del mundo. Sólo China e India juntas podrían añadir entre 25 y 30 millones más al año en una década; y cabe dentro de lo posible que en los próximos 30 años ambas sumen 600 millones más. Hay pocas posibilidades de que el petróleo en el mercado pueda satisfacer esta vertiginosa demanda.

Por supuesto que una crisis muy grave —una guerra, una depresión económica mundial, el hundimiento de una o varias potencias económicas— reduciría la demanda de petróleo drásticamente. Hay dos posibilidades bastante mejores. La primera es el diseño de vehículos de mucha mayor eficiencia energética y que utilicen tipos de energía con bajas emisiones de carbono, como la electricidad o el hidrógeno. Los grandes fabricantes han prometido para 2010 vehículos propulsados sólo con baterías e híbridos enchufables; también para esa fecha se esperan ensayos de coches de pilas de combustible de hidrógeno.

Estas técnicas se enfrentan a problemas irresueltos de costes, rendimiento e infraestructura. La investigación técnica, el desarrollo y los ensayos, así como la infraestructura de apoyo, deberían llevarse a cabo con fondos públicos para asegurar que se produzca a tiempo el cambio a los vehículos propulsados por nuevas energías eficientes (y de bajas emisiones de dióxido de carbono).

La segunda posibilidad es la reconfiguración gradual de la vida urbana para que reduzcamos nuestra dependencia del coche y nos acostumbremos a ir caminando, en bicicleta o en transporte público. A pesar de los criterios ideológicos del libre mercado, la dispersión urbana es una cuestión de reglamentación urbanística y de dotación de infraestructuras públicas (construir carreteras en vez de trenes ligeros), no menos que de elección personal.

Es probable que la crisis energética se agrave antes de que empiece a mejorar. No sólo tiende en sí a generar estanflación (inflación con estancamiento económico), sino disputas, o incluso de guerras, por el petróleo, y a marginar más a los pobres, que no podrían costearse el transporte, o ni siquiera los alimentos si EE.UU. mantuviese su peligrosa política de convertir el maíz en combustible de etanol. Esta crisis podría, sin embargo, ser un acicate decisivo para actuar e inducir cambios esenciales en técnicas y estilos de vida. Aún no es demasiado tarde para enfilar el camino más productivo, pero el tiempo se acaba.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.



MATT COLLINS

El infinito

Es posible razonar con precisión acerca del infinito, y cuando lo hacemos nos encontramos con un mundo de resultados sorprendentes

Agustín Rayo

Imaginemos un hotel infinito: por cada número natural (0, 1, 2, 3, ...), hay una habitación con ese número. Imaginemos, además, que el hotel está lleno. El huésped 0 ocupa la habitación 0; el huésped 1, la habitación 1, y así sucesivamente.

Cuando un hotel finito está lleno, no hay manera de alojar más gente (a menos que alguien se muestre dispuesto a compartir habitación). Pero en el caso de nuestro hotel infinito, que toda habitación esté ocupada no es impedimento para alojar gente adicional, sin que nadie comparta habitación.

Digamos que Oscar es un nuevo cliente. Lo único que tiene que hacer el gerente del hotel para encontrarle habitación es comunicar lo siguiente: "Le solicitamos a cada huésped que se cambie a la habitación de al lado. El huésped 0 deberá moverse a la habitación 1; el huésped 1 deberá moverse a la habitación 2; y así sucesivamente." Al cabo de este movimiento, cada uno de los huéspedes originales seguirá teniendo habitación. (Para todo número natural *n*, el huésped *n* estará hospedado en la habitación $n + 1$). ¡Y la habitación 0 habrá quedado disponible para Oscar! (*véase la ilustración 1*).

La situación parece paradójica. Sabemos que hay tantos huéspedes pre-Oscar como habitaciones (porque antes de que llegara Oscar había una habitación por huésped). Pero también sabemos que hay tantas habitaciones como huéspedes pos-Oscar (porque después de que llegara Oscar también había una habitación por persona). Por tanto, debe haber tantos huéspedes pre-Oscar como huéspedes pos-Oscar. ¿Cómo es esto posible?

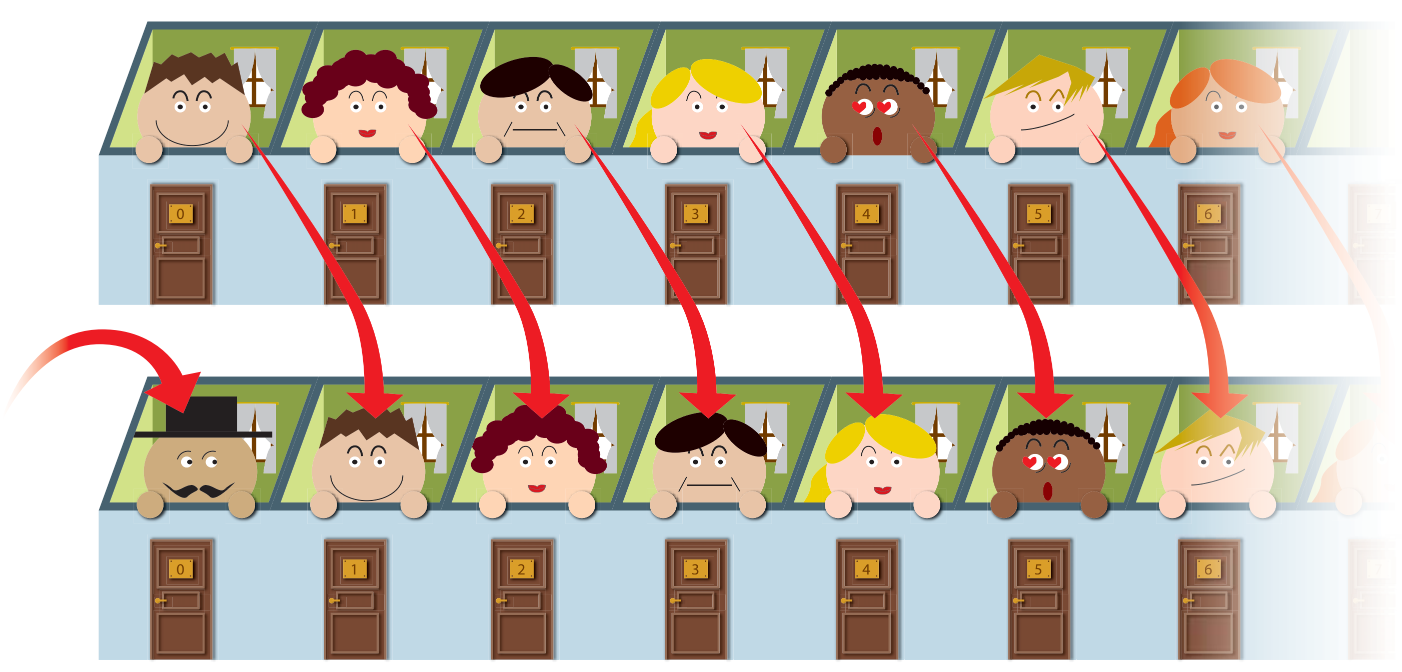
Para entender lo que acontece, es necesario aclarar la frase "hay tantas Fs como Gs". En este contexto significa que hay una *biyección* entre las Fs y las Gs. Es decir: existe una manera de emparejar Fs con Gs tal que toda F está emparejada con una sola G y cada G está emparejada con una sola F. Sabemos, por ejemplo, que hay una biyección entre los niños y las niñas cuando cada niño está tomado de la mano de una sola niña y cada niña está tomada de la mano de un solo niño.

Al declarar que hay tantos huéspedes pre-Oscar como huéspedes pos-Oscar, lo único que queremos indicar es que existe una biyección entre los huéspedes pre-Oscar y los huéspedes pos-Oscar. (Y sabemos que existe tal biyección: basta con emparejar a cada huésped pos-Oscar con el habitante original de su actual habitación.) Si la situación parece sorprendente es porque las situaciones a las que solemos enfrentarnos son finitas.

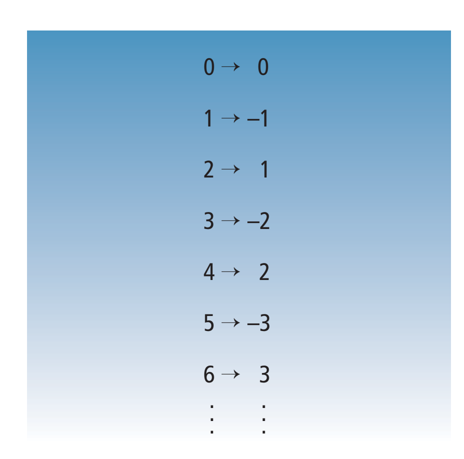
Cuando a un conjunto finito se le agrega un elemento, o cuando se le retira

¿Quiere saber más?

Una buena introducción al mundo de los números infinitos es "Infinity and the Mind". R. Rucker. Princeton University Press, 2004.



1. El Hotel de Hilbert, concebido por el matemático alemán David Hilbert. Aunque el hotel esté totalmente lleno, puede encontrársele una habitación a Oscar.



2. Hay una biyección entre los números naturales y los números enteros.

un elemento, el conjunto resultante nunca se halla en biyección con el conjunto original. Pero las cosas son distintas cuando vamos más allá de lo finito. Los conjuntos infinitos están siempre en biyección con alguno de sus subconjuntos propios. De hecho, una definición posible de 'C es un conjunto infinito' es 'existe una biyección entre C y alguno de sus subconjuntos propios'.

Los números enteros (... –2, –1, 0, 1, 2, ...) incluyen los números negativos además de todos los números naturales (0, 1, 2, 3, ...). Pero es posible definir una biyección entre los números naturales y los enteros (*véase la figura 2*). También es posible definir una biyección entre los números naturales y los números pares, y entre los números naturales y los números primos.

Más sorprendente todavía: hay una biyección entre los números naturales y los números *racionales* (es decir, los números *a*/*b* donde *a* y *b* son números naturales positivos). La manera más fácil de

1/1	1/2	1/3	1/4	1/5	...
2/1	2/2	2/3	2/4	2/5	...
3/1	3/2	3/3	3/4	3/5	...
4/1	4/2	4/3	4/4	4/5	...
5/1	5/2	5/3	5/4	5/5	...
...	...	...	...	...	...

3. Siguiendo las flechas rojas, se puede verificar que hay tantos números naturales como números racionales.

verlo es construyendo una cuadrícula infinita como la de la figura 3. Todo número racional aparece en alguna celda de la cuadrícula. Para mostrar que hay una biyección entre los números naturales y los números racionales, basta con asignarle un número natural diferente a cada celda. Hay muchas maneras de hacerlo, pero yo decidí seguir la ruta trazada por las flechas rojas de la figura 3. (Algunos números racionales aparecen más de una vez en la cuadrícula —el número 1/2, por ejemplo, aparece como '1/2', '2/4', '3/6', etc.—, pero puede seguirse la misma ruta teniendo cuidado de ignorar las celdas con números racionales que se hayan contado antes.)

Si hay tantos números naturales como números racionales, ¿no será que existe una biyección entre *cualesquiera* dos conjuntos infinitos? Resulta que la respuesta es 'no': *hay infinitos más grandes que otros*.

Por ejemplo, hay más números reales entre 0 y 1 que números naturales. (Los números reales entre 0 y 1 son aquellos que pueden escribirse como una secuencia infinita de la forma $0{,}d_1d_2d_3...$, donde cada d_n es un dígito entre 0 y 9.)

La prueba de este resultado es sencilla. Supongamos que no fuera así. Entonces, a cada real entre 0 y 1 se le podría asignar un número natural diferente. Esto nos permitiría hacer una lista de todos los números reales entre 0 y 1, como la de la figura 4. Consideremos el número $d = 0{,}a_1b_2c_3d_4...$, que se obtiene tomando dígitos de la lista en diagonal, como muestra la figura, y definamos d^* —el hermano maligno de *d*— como $0{,}f(a_1)f(b_2)f(c_3)f(d_4),...$ (donde $f(x) = 1$ si $x \neq 1$, y $f(x) = 2$ si $x = 1$). El problema con d^* es que sabemos que no puede estar en la lista de la figura 3: tiene que ser diferente del primer número en la lista porque $f(a_1) \neq a_1$, y diferente del segundo número en la lista porque $f(b_1) \neq b_1$, y así sucesivamente. Pero d^* es un número real entre 0 y 1. Así que hemos identificado un número real entre 0 y 1 que no está en nuestra lista, contradiciendo el supuesto de que *todo* número real entre 0 y 1 está en la lista. *Quod erat demonstrandum.*

¿Qué pasaría si en lugar de considerar sólo los números reales entre 0 y 1 consideráramos todos los números reales? Sorprendentemente, no tendríamos un infinito más grande. Hay tantos números reales entre 0 y 1 como números reales. También hay tantos números reales como puntos en una línea. Y hay tantos puntos en una línea como puntos en un plano, y tantos puntos en un plano como en el espacio. De hecho, es posible demostrar que hay tantos puntos en una línea como puntos en un espacio de cuatro dimensiones, o cinco dimensiones, o seis... ¡Incluso un espacio con tantas dimensiones como números naturales no tiene más puntos que una línea!

Hasta ahora hemos identificado dos tamaños de infinito: un infinito pequeño, que corresponde a los números naturales y los números racionales, y un infinito más grande, que corresponde a los números reales, los puntos en una línea y los espacios *n*-dimensionales. ¿Habrá infinitos de otros tamaños?

0,	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	...
0,	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	...
0,	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	...
0,	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	...
0,	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	...
...	...	...	...	...	...	...

$$d = 0{,}a_1\,b_2\,c_3\,d_4\,e_5\,...$$

$$d^* = 0{,}f(a_1)\,f(b_2)\,f(c_3)\,f(d_4)\,f(e_5)\,...$$

$$f(x) = 1 \quad \text{si} \quad x \neq 1$$

4. Si suponemos que todo número real entre 0 y 1 aparece en esta lista llegaremos a una contradicción, pues d^* es un número real entre 0 y 1 que no puede estar en la lista.

El gran matemático alemán Georg Cantor, quien probó muchos de los resultados que hemos discutido aquí, probó también que un conjunto siempre tiene más subconjuntos que elementos. De esto se sigue que hay más subconjuntos de números reales que números reales, y más subconjuntos de subconjuntos de números reales que subconjuntos de números reales, y así sucesivamente. ¡Hay infinitos tamaños de infinito!

Agustín Rayo es profesor asociado de filosofía en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.

La curva del corazón

¿Qué tienen en común la luz que se refleja en una taza de café y el diente de una rueda dentada que gira sobre otra? Que trazan la misma curva

Norbert Treitz

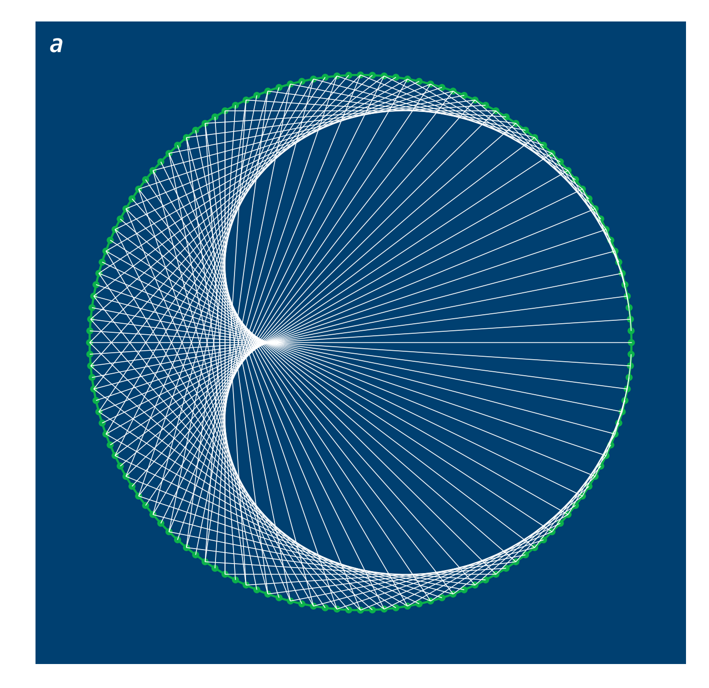
El punto focal de un espejo cóncavo o de una lente se llama así porque, cuando al espejo le da el Sol, puede llegar a estar muy caliente, más incluso que el astro (foco viene de *focus*, fogón). Se puede explicar con la óptica de rayos, en la que los rayos de luz casi paralelos del Sol se reflejan o refractan de tal manera, que se dirigen todos a un mismo punto: el foco. Así, se entiende que se ilumine y caliente tanto.

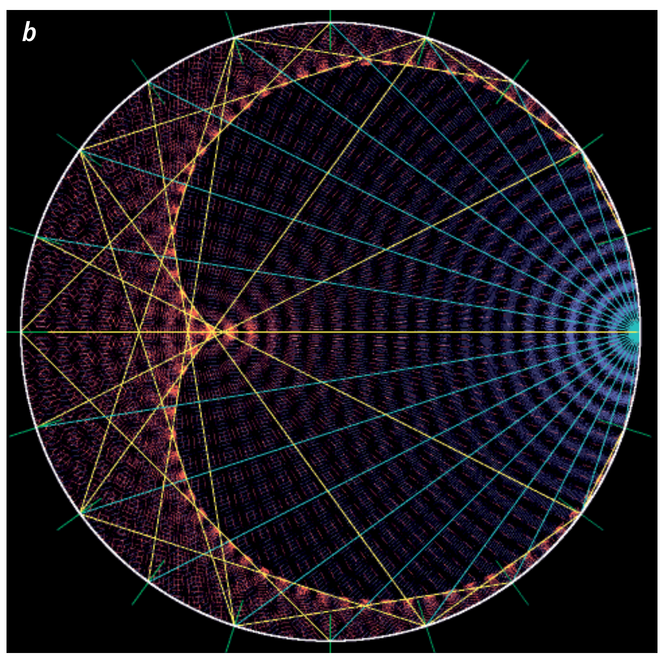
Desde el punto de vista de la óptica ondulatoria cuesta mucho más entenderlo. Las ondas de luz llegan a todas partes desde todas partes, pero cuando las relaciones de fase entre ellas están desordenadas, se amortiguan unas a otras, en vez de reforzarse. Verdaderamente caliente e iluminado (o ensordecedor, si se trata de ondas sonoras) devendrá sólo aquel punto donde las ondas se encuentren casi con la misma fase. En el artículo que dedicamos al antiparalelogramo [*véase* "El antiparalelogramo", en Investigación y Ciencia, febrero 2008], vimos que sólo el espejo parabólico (geométricamente, un paraboloide de revolución) tiene, en ese sentido del que acabamos de hablar, un punto focal. Los trenes de ondas procedentes del Sol llegarán a dicho punto habiendo recorrido caminos de una misma longitud, siempre y cuando el Sol (al que cabrá suponer infinitamente alejado) se encuentre justo en el eje de rotación, por la parte interior de la bóveda.

Las imágenes de los objetos astronómicos que queden fuera del eje se emborronarán algo. Si en vez de un espejo parabólico se usa otro esférico, la falta de nitidez no dependerá del ángulo, aunque tampoco desaparecerá. Eso sí, cabrá paliarla mucho gracias a las correcciones del telescopio Schmidt. Es verdad que un elipsoide de rotación estirado tiene, geométricamente hablando, dos puntos focales; ahora bien, ondulatoria y radialmente cada uno de ellos es la imagen del otro, y no del Sol. Debiera entonces tomarse un elipsoide gigantesco tal, que el Sol se hallara en uno de sus puntos focales y nosotros en el otro. Por razones prácticas nos daremos por satisfechos con una pequeña pieza en el extremo terráqueo: el espejo parabólico.

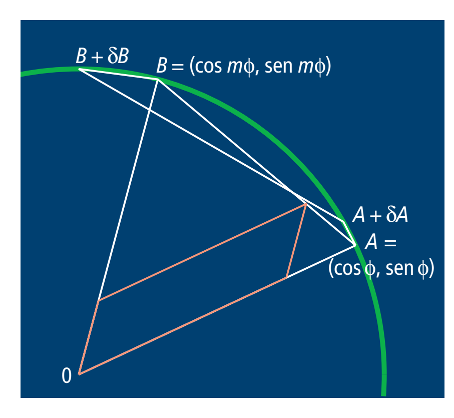
Pero, ¿qué sucede si enviamos luz hacia un espejo curvo desde un punto o una fuente que se encuentre "digamos que a una distancia infinita" y que no caiga en el eje óptico? En vez de concentrarse la luz en un "punto" (que nunca podrá tener menor tamaño que la longitud de onda), se dispersará por una zona extensa, con una superficie límite más o menos nítida. En caso de restringirnos a dos dimensiones, tal superficie se convierte en una curva sobre la que hará más calor y que estará bastante iluminada, y a la que por ello se denominará cáustica (del griego *kaustikos,* "que quema"). Para cada perfil de espejo y para cada ubicación de la fuente de luz puntual —para cada dirección de la onda

1. Los rayos de luz que parten de una fuente luminosa sobre el extremo derecho del círculo generan una cardioide (*representado por un patrón de 144 hilos, a, y ondulatoriamente, b*). La luz que incide paralelamente desde abajo genera la parte superior de una nefroide (*c* y *d*).





CHRISTOPH PÖPPE, SEGUN NORBERT TREITZ (*a*); NORBERT TREITZ (*b*)



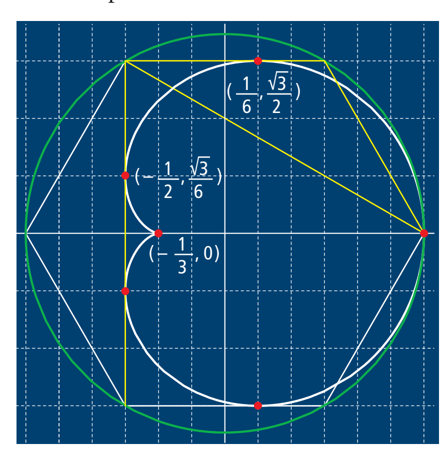
2. Así se encuentran los puntos de la cáustica. En este ejemplo *m* es igual a 3.

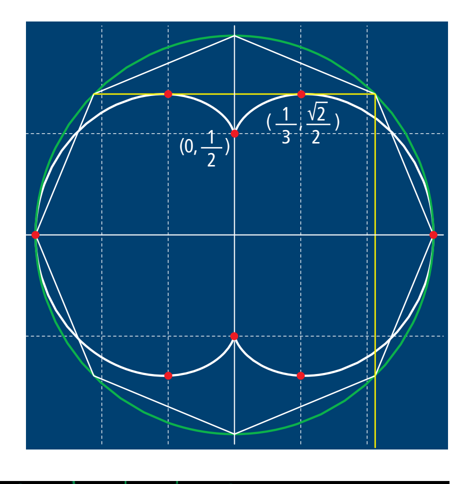
plana que viene— habrá la correspondiente cáustica (*véase el recuadro*).

Nos ocuparemos de aquí en adelante de unos espejos muy sencillos, las circunferencias reflectantes, versión en dos dimensiones de los espejos esféricos o cilíndricos tridimensionales. Las fuentes luminosas se situarán en el infinito o en la circunferencia especular misma. Pongamos una taza casi rebosante de leche bajo la luz solar cuando el Sol esté muy cerca del horizonte, o iluminemos su interior con una pequeña linterna puesta en el borde. En el segundo caso se obtendrá un cardioide (la "curva del corazón"), en el primero media nefroide (la "curva del riñón"). Si queremos ver la nefroide entera, necesitaremos, bien un segundo Sol en el lado opuesto, bien un espejo de bolsillo situado adecuadamente. En cualquier caso, la media nefroide se parece cualitativamente a la mitad interesante de la cardioide, tanto, que en tazas o en anillos de boda (cilíndricos por dentro) vienen la una y la otra a dar lo mismo.

Los juegos de hilos de Cremona

Cardioides y nefroides son epicicloides; vale decir, curvas que describe un punto sobre una circunferencia que a su vez rueda sobre otra. ¿Cómo pueden generar la misma curva dos procesos físicos tan diferentes? Luigi Cremona (1830-1903), al que los ingenieros conocen por su tratamiento gráfico del equilibrio de fuerzas en estática, tendió un puente geométrico entre la óptica y la cinemática, un puente de hilos.

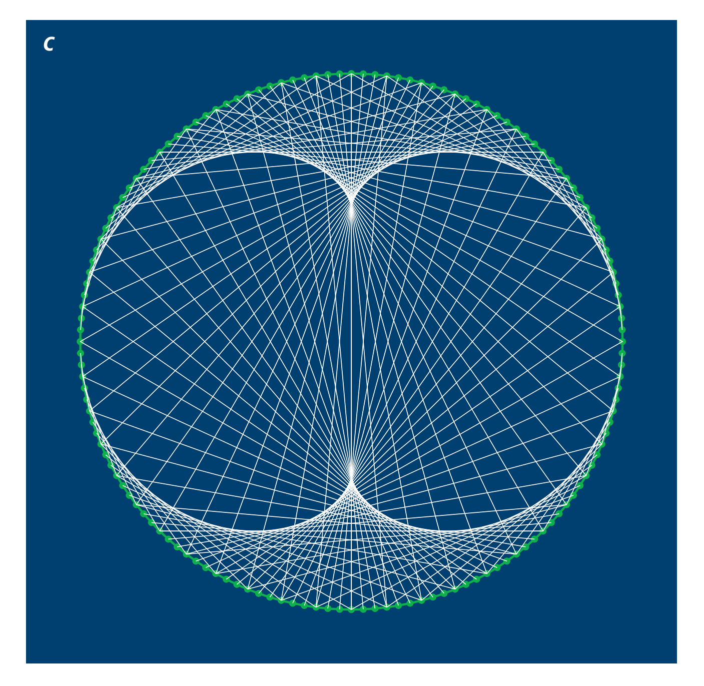


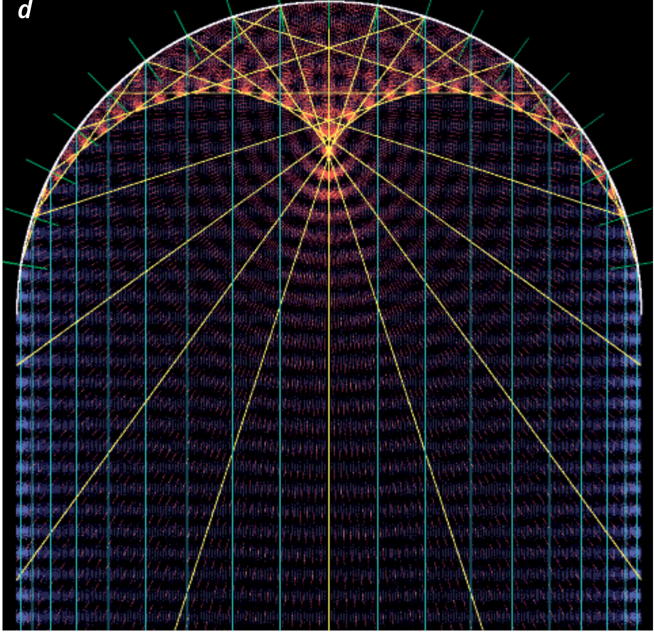


3. Un hexágono regular ayuda a encontrar puntos especiales de la cardioide (*izquierda*): por sus esquinas pasan rayos de luz especiales (*en amarillo*), que proporcionan las tangentes verticales y horizontales. Similarmente útil para dibujar la nefroide es el octógono regular (*derecha*).

Clavemos, en un tablero, n agujas a modo de esquinas de un polígono regular de n vértices. Numerémoslas mentalmente del 0 al $n - 1$. A continuación, escojamos un número entero m; tendamos una cuerda desde el vértice 1 hasta el m, del 2 al $2m$ y, en general, desde el i hasta el $i \cdot m$, donde más allá de $n - 1$ seguiremos contando siguiendo el círculo: la esquina n será la esquina 0, la esquina $n + 1$ la esquina 1, y la $i \cdot m$ la $(i \cdot m)$ módulo n, que es el resto al dividir ese número por n. En vez de martillos, agujas y cuerdas podemos servirnos de regla y compás o de un programa de ordenador.

Imaginemos una fuente de luz puntual en la esquina 0 (en el punto de la circunferencia situado más a la derecha). Un rayo de luz que partiera desde ahí hasta la esquina i se reflejaría en la parte interior de la circunferencia reflectante hacia la esquina $2i$. Así que para $m = 2$ el di-





CHRISTOPH PÖPPE, SEGUN NORBERT TREITZ (*gráficas y c*); NORBERT TREITZ (*d*)

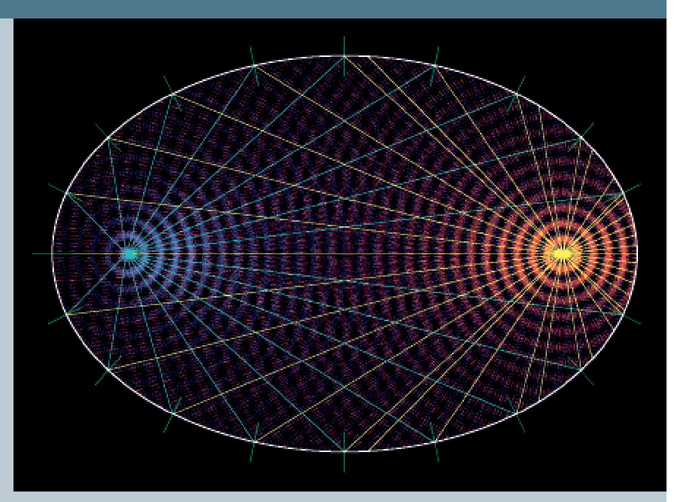
LA CAUSTICA EN LA REPRESENTACION ONDULATORIA

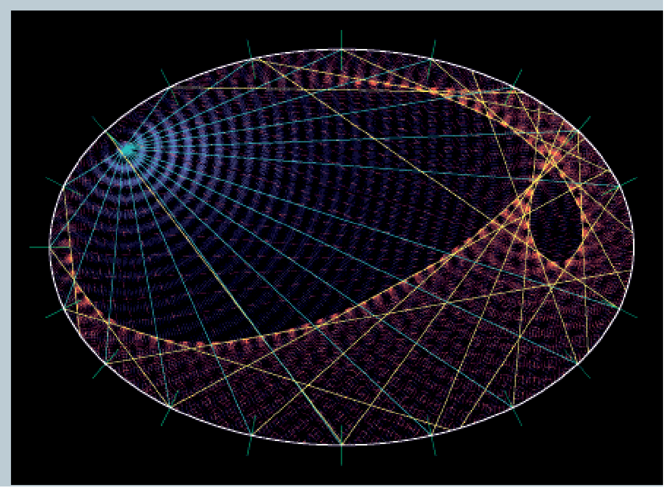
LAS ONDAS DE LUZ salen con la misma fase del punto focal izquierdo de una elipse, se reflejan en el borde de esta figura y se encuentran de nuevo, con la misma fase, en el otro punto focal, pues han recorrido un trayecto igual independientemente del lugar donde se reflejan. Se trata de una de las propiedades de la elipse.

En estas ilustraciones las crestas de las ondas que salen de la fuente aparecen representadas en azul; las reflejadas, en rojo. Son colores arbitrarios, sin relación alguna con los colores de la luz; al fin y al cabo, la luz no cambia su frecuencia con la reflexión, y su longitud de onda —para elipses perceptibles a simple vista— es mucho menor que en estos gráficos. El salto de fase de la onda de luz en la reflexión no se ha tenido en cuenta en las imágenes porque su influencia es insignificante. Para representar los hilos se han dibujado líneas en azul claro (antes de la reflexión) y en amarillo (después), con los ejes de incidencia en verde (los segmentos cortos en la elipse). La superficie del espejo misma es blanca.

Desde otro punto, aquí, como ejemplo, justo encima del punto focal izquierdo, la elipse proporciona una cáustica, en vez del punto imagen. Aparece como la curva que delimita la zona que está cubierta por la onda reflejada y como la envolvente de sus hilos. Los puntos de la cáustica muestran relaciones de fase fijas con la fuente de luz, que podemos imaginar coherentes. Como en el caso de los puntos imagen, la cáustica no es nítida porque le lleguen muchos más rayos, sino porque las ondas, que de por sí se hallan por todas partes, se encuentran allí con la misma fase.

Si pasamos de una elipse a un elipsoide de rotación (tridimensional), la cáustica deviene una superficie curva.





NORBERT TREITZ

bujo de las cuerdas nos muestra el trayecto de los rayos de una fuente puntual de luz instalada en la circunferencia.

Rayos paralelos que incidan exactamente desde abajo pasarán —por ejemplo— por la esquina $n - i$ (que también podemos denominar $-i$ porque así ya calculamos módulo n) y la esquina i. Allí, ese rayo se reflejará hacia la esquina $3i$. El patrón de hilos para $m = 3$ nos muestra, pues, el recorrido de la luz en la taza de café. Los patrones serán más realistas cuanto más grande sea n. Se observará entonces claramente una envolvente de estas cuerdas de la circunferencia. Matemáticamente, la envolvente se obtiene cuando "se hace tender n a infinito".

Nada nos impide escoger valores de m mayores que los casos físicamente relevantes $m = 2$ y $m = 3$. Obtendremos una figura con simetría de giro $(m - 1)$-tuple.

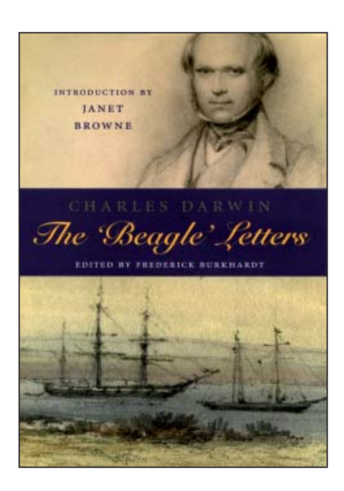
¿Cómo se determina esta envolvente? Situemos el origen del sistema de coordenadas en el centro del círculo, elijamos el radio del círculo igual a uno y midamos el ángulo como es habitual, desde el semieje con valores de x positivos. Habrá un continuo de cuerdas de la circunferencia; irán desde el punto A del perímetro, de ángulo ϕ, hasta el punto B, de ángulo $m\phi$. Cada punto de la envolvente será también punto de una de estas cuerdas, y la cuerda correspondiente será tangente a la envolvente en dicho punto. Pero, ¿de qué punto se trata?

Se trata del punto de corte de la cuerda con la cuerda "infinitesimalmente vecina". Eso significa que se determina el punto con una cuerda vecina y luego se hace tender una a la otra; así se va acercando el punto de corte al punto buscado. La secante de A a B y su vecina de $A + \delta A$ a $B + \delta B$ forman, junto con los trocitos de unión, un cuadrilátero que, en el punto de corte, se descompone en dos triángulos casi semejantes. Sus tamaños tienen una relación de m:1; por tanto, el punto de corte también corta la cuerda con una relación m:1.

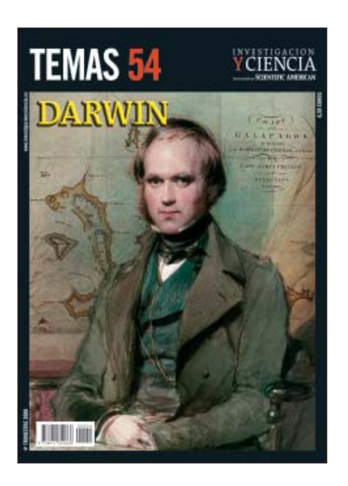
Dicho de otra manera: el punto de corte buscado es $m/(m + 1)$ veces el vector A más $1/(m + 1)$ veces el vector B. El punto A rueda sobre el perímetro del círculo; también el punto B, si bien con una velocidad m veces mayor.

Tenemos una especie de reloj ante los ojos. Sin embargo, el punto de partida ("las doce") no está arriba, sino a la derecha, las manecillas se mueven en sentido contrario al horario y la manecilla pequeña es la más rápida. Ambas manecillas forman un paralelogramo y nuestra curva es el recorrido del vértice del paralelogramo opuesto al origen de coordenadas.

O bien podemos figurarnos la manecilla pequeña colocada al final de la punta de la grande; entonces será la punta de la manecilla pequeña la que describirá la envolvente. Y de la misma forma se movería una rueda dentada de radio $1/(m + 1)$ que rodara sobre una rueda dentada fija de radio $(m - 1)/(m + 1)$.



CHARLES DARWIN.
THE BEAGLE'S LETTERS.
Edición preparada por Frederick Burkhardt. Introducción de Janet Browne. Cambridge University Press; Cambridge, 2008.



DARWIN,
por Barbara Continenza.
Prensa Científica, S. A.
Barcelona, 2008.

Darwin

Introducción a una efeméride que transformó la biología

Ante el bicentenario del nacimiento de Charles Darwin (1809-82) y el sesquicentenario de la aparición de su *Sobre el origen de las especies* (1859), la editorial Prensa Científica nos ofrece una biografía del naturalista (*Darwin*) y un número extraordinario de *Investigación y Ciencia*, en su edición de enero de 2009, dedicado a la teoría de la evolución. Añadamos su epistolario durante la travesía del *Beagle* (*The Beagle's Letters*) y tendremos una aproximación valiosa a la vida y la obra de quien puso un nuevo rumbo a la biología.

Al relatar la vida de Darwin, los historiadores suelen detenerse en los abuelos, por la influencia en él ejercida y la confortable herencia que le legaron. El abuelo materno, Josiah Wedgwood, creó una de las principales fábricas de porcelana de Gran Bretaña; de los ocho hijos del matrimonio con su prima Sara, la primogénita, Susannah, sería la madre de Charles Darwin. El abuelo paterno, Erasmus Darwin, ocupa un lugar discreto en la historia de la ciencia; médico y naturalista, se casó con Mary Howard. Tuvieron cinco hijos; el tercero, Robert Waring Darwin, sería el padre de Charles. Erasmus escribió *El jardín botánico*. *Zoonomia* y *El templo de la naturaleza*, donde defendía la teoría de la herencia de los caracteres adquiridos.

En 1818, Charles Darwin entra interno en la escuela elitista de Shrewsbury, dirigida por Samuel Butler. Allí pasaría siete años. En 1825, su padre le envía a Edimburgo para que inicie los estudios de medicina, siguiendo la tradición familiar. Sólo realizó dos cursos, entre la indolencia y el desánimo. Pese a ello, y a extramuros de las aulas, descubrió un mundo estimulante, rico en ideas y en personalidades. Se integró en la Sociedad Pliniana de Historia Natural, agrupación estudiantil en cuyas reuniones se discutía de política, de ciencia y filosofía; leyó la *Zoonomia* de su abuelo y el *Sistema de los animales sin vértebras* de Lamarck. Desde entonces se sentiría interesado en la cuestión del origen de las formas orgánicas.

De 1828 a 1831 asiste, en la Universidad de Cambridge, a los cursos que le capacitaban para recibir órdenes sagradas. "Perdí soberanamente el tiempo", dejó escrito tras aprobar los exámenes de matemáticas, lenguas clásicas y filosofía moral. Sólo disfrutaba con la historia natural. Coleccionó insectos y frecuentó las lecciones de botánica de John Henslow, clérigo que se convertiría en uno de sus amigos más próximos, junto con Adam Sedgwick, docente de geología. En agosto de 1831, estimulado por Henslow, realizó una breve campaña geológica en el norte del País de Gales, donde se familiarizó con los caprichos de la estratigrafía. Su compañero Charles Whitley, un alumno brillante en matemática, le enseñó a moverse por las galerías de arte y apreciar la belleza de la naturaleza.

En noviembre de 1831 se embarca en el *HMS Beagle*, invitado por el capitán Robert FitzRoy, quien ya había participado en un primer viaje del buque y conocía las posibilidades excepcionales que la travesía ofrecía para la observación científica. FitzRoy quería un naturalista joven, al que pudiera tratarle de igual, comprometido con su causa y partícipe en las tareas de a bordo. A modo de programa le regaló a Darwin el primer volumen de los *Principles of Geology* (1830–33), de Charles Lyell. Quedó tan entusiasmado, que se las arregló para que se le enviasen los dos volúmenes siguientes en cuanto aparecieran.

Darwin irá anotando la derrota por las costas impresionantes de América del Sur, la feracidad del Brasil tropical, el abigarramiento cultural, la atracción de islas exóticas y fenómenos de la naturaleza activos en toda su potencia. Vale la pena seguirlo de la mano de su epistolario, leída la introducción documentada de Janet Browne. Ese viaje alrededor del mundo duró cinco años, hasta octubre de 1836. En particular, las cartas que intercambió con Henslow revelan el estado del conocimiento biológico de su tiempo y muestran el afianzamiento progresivo de Darwin en su propio criterio. Cazó insectos, microvertebrados, aves, arañas, corales, moluscos. Recuperó fósiles. Prestó particular atención a las plantas. Reunió especímenes mineralógicos. Aunque se había provisto de libros que le permitían identificar y clasificar con bastante aproximación, era consciente de que necesitaba la ratificación de un experto.

Opuesto a las teorías catastrofistas entonces vigentes sobre la formación del relieve, Lyell deslumbró a Darwin con sus tesis uniformitaristas. Nada pudo haber sucedido en el pasado geológico que no hallara ahora su reflejo e iteración. Lyell insistía en un planeta antiquísimo, sin pruebas de su comienzo, ni perspectiva de su fin. Rechazaba el transformismo lamarckista. Aunque aportó explicaciones de algunos fenómenos que él creía más sólidas que las de Lyell (origen de los

arrecifes de coral o levantamiento reciente de la Cordillera de los Andes), Darwin abraza con entusiasmo la hipótesis de los cambios graduales y mínimos, supuesto clave en el origen de nuevas especies.

En septiembre de 1835, el *Beagle* se encaminó hacia las islas Galápagos. Permaneció en ellas cinco semanas. Darwin no reparó, sin embargo, en la diversificación de las especies, seducido por las iguanas, las tortugas, las aves y el paisaje volcánico. Advirtió, que los pinzones parecían diferir de una isla a la otra y divergían a su vez de los del continente. Pero fue luego en Londres, cuando John Gould le señaló que los especímenes de las Galápagos pertenecían a diversas especies de pinzones, con picos distintos adaptados a una dieta insectívora, frugívora o comedora de cactus.

En el último tramo del viaje, desde Ciudad del Cabo, comenzó a reflexionar sobre la diversidad de cuanto había visto. Sin ser todavía un evolucionista, buscaba la razón última de tanta diversidad y su posible adquisición a través de cambios graduales. Andando el tiempo, identificaría tres factores del viaje que podían considerarse el punto de arranque de sus opiniones evolucionistas: los fósiles de Patagonia, las pautas de distribución geográfica del avestruz sudamericano y la vida animal del Archipiélago de las Galápagos. Además, encontraría luminosas las metáforas de Thomas Robert Malthus sobre el crecimiento demográfico. Los fósiles constituyeron un auténtico golpe de fortuna. Localizados cerca de Bahía Blanca, se trataba de restos de mamíferos extintos (*Megatherium, Taxodon* y *Glyptodon*). Darwin se percató de que los animales extintos respondían al mismo patrón de otros comunes de la Pampa. Parecía existir, pues, una continuidad de "tipo" animal a lo largo del tiempo. Luego, en el extremo sur, cazó una nueva especie de avestruz que era menor que la forma septentrional. Se sirvió de los dos tipos de *Rhea* para ilustrar la exclusión geográfica entre especies estrechamente emparentadas.

Darwin no desarrolló la teoría de la evolución durante el viaje. Pero volvió impresionado por la prodigalidad de la naturaleza, el color, la variabilidad y la abundancia, por un lado, y la lucha despiadada, por otro. ¿Cómo cohonestarlo? En 1837 comienza la redacción de los *Cuadernos*. Hallamos los primeros escarceos sobre la continuidad entre el hombre y el resto del mundo animal, muy especialmente en los cuadernos *N* y *M*, denominados también *Cuadernos sobre el hombre, el espíritu y el materialismo,* o *Cuadernos metafísicos*. En ellos aborda la expresión de las emociones, la conciencia, las relaciones entre alma y cuerpo, instinto e inteligencia. Darwin vio por primera vez un gran simio (Jenny, un orangután hembra de tres años) en marzo de 1837, en el zoológico de Londres. "El origen del hombre ha quedado ahora probado. La metafísica debería florecer. Quien entienda al babuino hará más por la metafísica que Locke", escribió el 16 de agosto de 1838.

El 29 de enero de 1839 se casa con su prima Emma. Ve en el nacimiento de su primer hijo, William Erasmus, una "excelente oportunidad". ¿De qué? Desde los primeros días de vida del vástago inicia una observación continua y sistemática de su conducta. Establece analogías con el comportamiento animal. Realiza pequeños ensayos; por ejemplo, ruidos suaves para determinar a partir de qué edad el niño identifica la procedencia de los sonidos; o desplaza rápidamente objetos cerca de su rostro para evaluar el carácter reflejo de sus reacciones. Estudia el desarrollo progresivo de la coordinación motora y de la facultad de manipulación de objetos. Se concentra muy especialmente en la aparición de las emociones y de las expresiones asociadas. Pretende, en definitiva, demostrar la continuidad entre las funciones psíquicas animales y humanas y su origen natural común.

En 1842 redacta el primer borrador sobre su teoría de la evolución y termina su trabajo sobre las barreras de coral. Un año después, publica el último volumen de su *Zoología del viaje del Beagle*. A principios de 1844, retoma el borrador aludido y empieza a elaborar una versión ampliada, con una argumentación más sólida y mejor trabadas las pruebas. Ese mismo año da fin a su libro sobre las islas volcánicas. Y lee la *Teología natural o demostración de la existencia y de los atributos de la divinidad, fundada en los fenómenos de la naturaleza* (1802), de William Paley, que demostraba la existencia de un "relojero inteligente" para explicar los mecanismos de la vida. Contrario a cualquier forma de transformismo, Darwin se mostrará hipercrítico ante los *Vestigios de la historia natural de la creación*, de Robert Chambers, que propugnaba una "visión científica alternativa de progreso", una suerte de evolución cósmica que involucraba a todas las especies, incluida la humana, en una ascensión por etapas bajo una presión evolutiva intrínseca.

En 1845 aparece la segunda edición revisada de su diario de viaje; en 1846, su obra sobre la geología de América del Sur. Continúa investigando en el origen de las especies. En octubre de 1846 emprende un estudio cuyo alcance y complejidad no había previsto, como tampoco el provecho que sacaría del mismo para su teoría: los cirrípedos. Reúne materiales de diversas procedencias y confecciona una monografía exhaustiva, fósiles incluidos, en tres grandes volúmenes, que publica entre 1852 y 1854.

En 1855 Wallace publica *Sobre la ley que ha regulado la introducción de nuevas especies*, donde presenta pruebas de la evolución de las especies, sin aclarar su mecanismo. Lyell informa a Darwin del artículo, quien lo encuentra ambiguo, pero anima por escrito a Wallace a proseguir y le comunica que también viene trabajando en ese campo desde hace más de veinte años. Por mediación de Hooker, Darwin entabla correspondencia con Asa Gray, botánico de Harvard, que trabaja en la distribución geográfica de las especies vegetales; en septiembre de 1857, le escribe una carta para detallarle los puntos capitales de su tesis evolucionista.

El 18 de junio de 1858, recibe de Wallace un artículo *Sobre la tendencia de las variedades a apartarse indefinidamente del tipo original*. Si Wallace hubiera leído su extenso manuscrito, comenta Darwin a Lyell, no habría podido hacer una mejor síntesis. Por consejo de Lyell y Hooker, el ensayo de Wallace, junto con un extracto del trabajo de Darwin y de la carta enviada por Darwin a Asa Gray se presentaron el 1 de julio de 1858 ante la *Sociedad Linneana*. Estos documentos estaban precedidos por una carta de Lyell y de Hooker, que daba fe de conocer los puntos de vista de Darwin desde 1844, y del hecho de que su teoría no había cambiado fundamentalmente desde 1839.

Darwin se aplica afanosamente a la elaboración de un resumen de su tratado inédito. A finales de noviembre de 1859 publica la que era, "sin ninguna duda, mi principal obra". El título escogido con su editor, Murray, es: *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life* ("Sobre el origen de las especies por medio de la selección natural, o la conservación de las razas

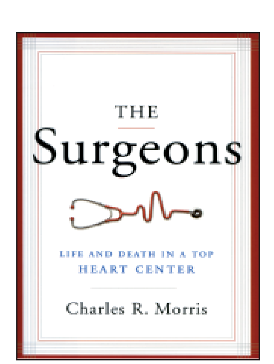
favorecidas en la lucha por la vida"). Agotada la primera edición en breve, aparece en 1860 la segunda y, en 1861, la tercera, complementada ésta con una *Noticia histórica sobre los progresos de la opinión relativa al origen de las especies*. No introduce modificaciones importantes hasta la quinta edición (1869); en la sexta y última (1872), añade un capítulo entero sobre las "Objeciones diversas a la teoría de la selección natural".

En *La fecundación de las orquídeas por los insectos y los buenos resultados del cruzamiento* (1862) explicaba las ventajas de la fecundación cruzada e ilustraba cómo habían desarrollado las orquídeas estructuras idóneas hasta lo sutil para atraer a los insectos polinizadores. En *Los movimientos y los hábitos de las plantas trepadoras* (1864), describía las diversas estrategias adoptadas por las plantas para "alcanzar la luz y el aire libre con el mínimo consumo de materia orgánica posible". En las aproximadamente 900 páginas de *La variación de los animales y las plantas bajo la acción de la domesticación*, obra publicada en 1868, Darwin presentará un alarde de pruebas observacionales en confirmación de la selección natural.

Después de tres años de intensa dedicación, publica en 1871 *La ascendencia del hombre y la selección sexual*, con una segunda edición revisada, tres años más tarde. A ese libro le sigue *La expresión de las emociones en el hombre y los animales* (1872). Terminadas esas dos grandes obras consagradas al hombre, Darwin retorna a las plantas, insectívoras y trepadoras en particular, la autofecundación y la fecundación cruzada, sin olvidar las diferentes formas de las flores. Finalmente, en 1880, aparece *La facultad motriz en las plantas*; mediante análisis de fisiología vegetal, explica cómo las plantas también pueden presentar un "comportamiento", es decir, efectuar movimientos, responder a estímulos, transmitir informaciones de una parte a otra de su organismo. Su última obra, publicada en octubre de 1881, está dedicada a las lombrices, que "han desempeñado en la historia del mundo un papel mucho más importante del que la mayoría supondría en un primer momento" (*La formación del humus por la acción de las lombrices, con observaciones sobre sus hábitos*).

Charles Darwin falleció el 18 de abril de 1882 y fue inhumado en la abadía de Westminster.

Luis Alonso



THE SURGEONS. LIFE AND DEATH IN A TOP HEART CENTER,
por Charles R. Morris.
W. W. Norton and Company; Nueva York, 2007.

A corazón abierto

Técnicas, profesionales y política sanitaria de la cirugía cardíaca

El autor de este libro, abogado y periodista especializado en temas financieros, se interesó por el tratamiento quirúrgico de las enfermedades cardíacas cuando supo que los Estados Unidos invierten más en el tratamiento y reparación del corazón que en el diseño de nuevos automóviles. Pasó un año en una de las unidades de cirugía cardiotorácica más importantes del país, perteneciente al Hospital Presbiteriano de Columbia, en Nueva York, y donde se realiza el mayor número de trasplantes de corazón.

Quería saber cómo piensan, juzgan y actúan los médicos, los detalles de su formación quirúrgica, las presiones a las que están sometidos y la remuneración que reciben, así como el papel desempeñado por los pacientes y por las empresas de suministro de equipamiento.

Para ello tuvo acceso a los quirófanos, a las salas del hospital, a los pacientes y a las reuniones de los cirujanos, sin más restricciones que las legales que amparan la confidencialidad de los datos médicos.

No es un libro "autorizado", ya que el manuscrito no fue leído por ningún miembro del hospital antes de su publicación. Aparecen por igual éxitos y fracasos, errores, dudas, problemas éticos, consideraciones económicas y discusiones de los miembros de los equipos quirúrgicos, aunque el propio autor afirma que no se ha esforzado en ocultar su admiración por los médicos con quienes convivió durante su estancia en el hospital.

A lo largo de diez capítulos, Charles R. Morris combina historias humanas, con datos económicos, apuntes históricos con detalladas descripciones de técnicas quirúrgicas, todo lo cual ofrece una visión caleidoscópica del quehacer diario en la cirugía cardiotorácica. Con un lenguaje ágil y un estilo periodístico relata al lector la primera operación que presencia en un quirófano y los profesionales que intervienen, su viaje con un equipo de extracción de órganos, la dolorosa experiencia de una niña que no superó un trasplante de corazón, el extenuante período formativo de un residente de cirugía y las reuniones del equipo quirúrgico, a veces muy tensas, para evaluar los errores cometidos. Su interés por las implicaciones económicas de la asistencia médica aparece reflejado en el último capítulo, muy crítico con el sistema sanitario estadounidense. Sus elevados costes, uno de cuyos factores es para el autor la fascinación de las autoridades por los equipamientos técnicos de última generación en detrimento de programas de vacunación o de salud materno-infantil, lo hacen insostenible y abocado a la debacle. Para mejorarlo, Morris propone una serie de medidas que pasan por el establecimiento de un Plan Básico de Salud por parte del gobierno, obligatorio para todos los trabajadores a partir de salarios muy bajos y cuyos costes serían cubiertos por empresarios y asalariados. El libro se completa con dos apéndices dedicados respectivamente al funcionamiento del corazón y al sistema de clasificación de los hospitales de cirugía cardiotorácica de Nueva York.

Aunque esta obra se enmarca en un sistema sanitario muy concreto como es el estadounidense, su lectura es atractiva tanto para el profesional de la salud como para cualquier interesado en el campo de la cirugía, más allá de acercamientos televisivos muy alejados de la realidad.

María José Báguena Cervellera

INDICE ANUAL

Este índice contiene los títulos de los artículos y los nombres de los autores aparecidos en Investigación y Ciencia *a partir de enero de 2008*

TITULOS

AUTORES

EN EL PROXIMO MES DE ENERO

EVOLUCION

NUMERO MONOGRAFICO Y EXTRAORDINARIO

El legado de Darwin

Genética
de la selección natural

Origen del hombre

Del genotipo al fenotipo

Evolución de la mente

Futuro del hombre

Estratagemas
del creacionismo

